

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université 20 Aout 1955 SKIKDA



Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

N° d'ordre : D012123027D

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Spécialité: Mécatronique

Par

TOUIL ISSAM

Etude des comportements de composite à matrice thermodurcissable

Soutenue publiquement le 14/12/2023 devant le jury:

INEL Fouad	Professeur	Université 20 aout 1955 Skikda	Président
Khounfais Kamal	Professeur	Université 20 aout 1955 Skikda	Rapporteur
Aouici Samia	M.C.A	Université 20 aout 1955 Skikda	Examineur
Dib Amar	M.C.A	Université Badji Mokhtar Annaba	Examineur
Frihi Djamel	M.C.A	Université 08 Mai 1945 Guelma	Examineur
Bouakba Mustapha	Professeur	Université Kasdi Merbah Ouargla	Examineur

Année universitaire 2022-2023

Dédicace

Je dédie cet humble travail.

A ma mère **Toumi Aicha** et mon père **Amar**, en les remerciant pour tous leurs sacrifices et leur soutien en toutes circonstances

- **Rabih Yaramha** - je prie également Dieu pour que ma chère mère et mon père soient accueillis avec compassion et admis dans les jardins du paradis.

Je souhaite tout le succès et le bonheur à mon frère **Mohamed Raouf**,

A tous mes amis et collègues.

À tous ceux qui m'ont apporté leur soutien.

A l'âme du défunt, mon professeur **Lakhdar Khochmane** que Dieu, dans sa grande miséricorde, lui accorde son pardon et sa miséricorde.

Remerciements

Je remercie ALLAH de m'avoir accordé la santé, la patience et le courage tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de thèse, professeur KHOUNFAIS KAMEL. Je le remercie pour son écoute, ses conseils et ses encouragements qui m'ont été précieux pour mener ce travail à son terme.

Je tiens à remercier avec la plus grande gratitude Monsieur INEL FOUAD, Professeur à l'université 20 aout 1955 Skikda pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail ainsi que pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury.

Mes remerciements vont également au Professeur Frihi Djamel , Professeur Dib Amar , Professeur BOUAKBA Mustapha, Dr. Aouici Samia pour avoir accepté d'évaluer ce travail et de faire partie du jury de soutenance.

Mes sincères remerciements vont à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, en particulier professeur Kezzar mohamed, docteur Talbi nabil, docteur Tabet Smail, professeur Sari Mohamed Rafik et le professeur Bouzaouit Azzedine et tous mes collègues et parmi eux Khochmane hamza.

Je tiens également à remercier les professeurs du département de mécanique professeur Ridha Kelaiaia et docteur Nadir Abderrahmane .

Je tiens aussi à exprimer ma gratitude au personnel administratif dirigé par le Doyen de la faculté de Technologie, professeur Ammouchi Nesrine et ses adjoints Docteur Adlene Ramdane et professeur Metatla Abderrezak et Mme fatima. Enfin, je voudrais également exprimer ma gratitude envers toute ma famille, mes amis et à toutes les autres personnes qui ont participé à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici mes vifs remerciements.

TOUIL ISSAM

Résumé

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du développement des matériaux composites à matrice thermodurcissable et vise principalement à mieux comprendre leur comportement mécanique tout en mettant en évidence l'effet de certains problèmes liés aux critères de choix de ce type de composite.

Ainsi, le travail de recherche réalisé dans cette thèse de doctorat est de caractère purement expérimental.

Dans cet optique, un composite à matrice thermodurcissable à base de polyester renforcé, dans un premier temps, par des fibres de verre seuls et dans un second temps nous avons ajouté à ces composites, de la sciure de bois pour une bonne adhésion interfaciale.

La caractérisation mécanique des différents composites, élaborés et fabriqués à l'université de Skikda, a été faite essentiellement par évaluation de l'ensemble des propriétés mécanique de la résistance à la traction.

A cet effet, plusieurs séries d'éprouvettes ont été élaborées et caractérisées. Dans un premier temps, une première série fabriquée et testée est à matrice en polyester insaturé renforcé par des fibres de verre de type E et à taux massique variable. Par contre pour la deuxième série, nous avons pris les mêmes composites auxquels nous avons ajouté de la sciure de bois avec un taux massique variable de 1 à 10%. Cette première gamme d'essai a été faite dans des conditions normales de température (ambiante) et de pression.

Par contre et dans un second temps, des séries identiques d'éprouvettes ont été testées dans des conditions sévères et cela par immersion dans de l'eau de mer en trois temps (3, 21 et 30 jours).

La caractérisation mécanique réalisée par traction, a abouti à une large base de données expérimentale assez intéressante.

Cette dernière a été exploitée pour réaliser une étude statistique par analyse de variance (**ANOVA**) tout en proposant un modèle mettant en évidence l'effet du temps d'immersion dans l'eau de mer, du nombre et du diamètre des couches sur les propriétés mécaniques (module d'élasticité, résistance maximale et allongement total) de matériaux composites à matrice en polyester insaturé renforcés par de fibres de fibres de verre.

Afin de simplifier le protocole expérimental et pour mettre en évidence l'effet des facteurs d'expérimentation sur la réponse, nous avons aussi utilisé le modèle statistique réduit de **Taguchi**.

Ces deux modèles ont été déterminé pour optimiser les critères suscités et de mettre en évidence leur influence sur les propriétés mécaniques.

Mots clés :

Matériau composite, Thermodurcissable, Polyester, fibre de verre, Traction, ANOVA, Taguchi.

Abstract

This thesis work is part of the development of composite materials with a thermosetting matrix and mainly aims to better understand their mechanical behavior while highlighting the effect of certain problems linked to the selection criteria for this type of composite.

Thus, the research work carried out in this doctoral thesis is purely experimental in nature.

With this in mind, a thermosetting matrix composite based on polyester reinforced, firstly, with glass fibers alone and secondly we added sawdust to these composites for good interfacial adhesion.

The mechanical characterization of the different composites, developed and manufactured at the University of Skikda, was carried out essentially by evaluation of all the mechanical properties of tensile strength.

For this purpose, several series of test specimens were developed and characterized. Initially, a first series manufactured and tested has an unsaturated polyester matrix reinforced with type E glass fibers and with a variable mass ratio. On the other hand, for the second series, we took the same composites to which we added sawdust with a variable mass rate from 1 to 10%. This first test range was carried out under normal temperature (ambient) and pressure conditions.

On the other hand, and in a second step, identical series of test pieces were tested under severe conditions by immersion in sea water in three times (3, 21 and 30 days).

The mechanical characterization carried out by traction resulted in a large and quite interesting experimental database.

The latter was used to carry out a statistical study by analysis of variance (ANOVA) while proposing a model highlighting the effect of immersion time in sea water, the number and diameter of layers on the properties mechanical properties (modulus of elasticity, maximum strength and total elongation) of composite materials with an unsaturated polyester matrix reinforced with glass fiber fibers.

In order to simplify the experimental protocol and to highlight the effect of the experimental factors on the response, we also used the reduced Taguchi statistical model.

These two models were determined to optimize the criteria raised and to highlight their influence on the mechanical properties.

Keywords :

Composite material, Thermosetting, Polyester, fiberglass, Traction, ANOVA, Taguchi.

ملخص

تعد هذه الأطروحة جزءًا من تطوير المواد المركبة باستخدام مصفوفة التصلد بالحرارة وتهدف بشكل أساسي إلى فهم سلوكها الميكانيكي بشكل أفضل مع تسليط الضوء على تأثير بعض المشكلات المرتبطة بمعايير الاختيار لهذا النوع من المواد المركبة. وبالتالي، فإن العمل البحثي الذي تم إجراؤه في رسالة الدكتوراه هذه هو تجريبي بطبيعته.

مع أخذ هذا في الاعتبار، تم إنشاء مركب مصفوفة لدنة بالحرارة يعتمد على البولستر المقوى، أولاً، بالألياف الزجاجية وحدها، وثانياً أضفنا نشارة الخشب إلى هذه المركبات من أجل التصاق جيد بين الأسطح. تم إجراء التوصيف الميكانيكي لمختلف المركبات، التي تم تطويرها وتصنيعها بجامعة سكيكدة، بشكل أساسي من خلال تقييم جميع الخواص الميكانيكية لقوة الشد.

ولهذا الغرض، تم تطوير وتوصيف عدة سلاسل من عينات الاختبار. في البداية، كانت السلسلة الأولى التي تم تصنيعها واختبارها تحتوي على مصفوفة بوليستر غير مشبعة معززة بألياف زجاجية من النوع E وبنسبة كتلة متغيرة. من ناحية أخرى، بالنسبة للسلسلة الثانية، أخذنا نفس المركبات التي أضفنا إليها نشارة الخشب بمعدل كتلة متغير من 1 إلى 10%. تم إجراء نطاق الاختبار الأول هذا في ظل درجة الحرارة العادية (المحيطة) وظروف الضغط.

من ناحية أخرى، وفي خطوة ثانية، تم اختبار سلسلة مماثلة من قطع الاختبار تحت ظروف قاسية عن طريق الغمر في مياه البحر ثلاث مرات (3، 21، 30 يوماً). أدى التوصيف الميكانيكي الذي تم إجراؤه بواسطة الجر إلى قاعدة بيانات تجريبية كبيرة ومثيرة للاهتمام للغاية.

وقد تم استخدام الأخير لإجراء دراسة إحصائية عن طريق تحليل التباين (ANOVA) مع اقتراح نموذج يسلط الضوء على تأثير زمن الغمر في مياه البحر وعدد وأقطار الطبقات على الخواص الميكانيكية (معامل المرونة، القوة القصوى و الاستطالة الكلية) للمواد المركبة بمصفوفة بوليستر غير مشبعة معززة بألياف زجاجية. من أجل تبسيط البروتوكول التجريبي وإبراز تأثير العوامل التجريبية على الاستجابة، استخدمنا أيضاً النموذج الإحصائي المخفض لتاجوتشي.

تم تصميم هذين النموذجين لتحسين المعايير المطروحة وإبراز تأثيرها على الخواص الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية:

المواد المركبة، التصلد بالحرارة، البولستر، الألياف الزجاجية، الجر، أنفوا، تاجوتشي.

Table Des matières

Dédicace	i
Remerciement	ii
Résumé	iii
Table des Matières	vi
Liste des Figures	xii
Liste des Tableaux	xvii
Nomenclature	xix
Introduction générale	1
Chapitre I Généralités sur les matériaux composites	
I.1 Introduction	3
I.2 Les Matériaux Composites	3
I.2.1 Historique Des Matériaux Composites	3
I.2.2 Définition d'un Matériau Composite	4
I.2.3 Les matériaux composites et les différents domaines d'utilisation	5
I.2.4 Types de matériaux composites	5
I.2.4.1 Selon la nature des composants	5
I.2.4.2 Selon la forme du renfort	6
I.2.4.2.a Composés laminaires	6

I.2.4.2.b Composites renforcés de fibres	6
I.2.4.2.c Particules composites	6
I.2.5 Eléments constituant un matériau composite	7
I.2.5.1 Matrice	7
I.2.5.1.a Les matrices thermoplastiques	8
I.2.5.1.b Les matrices thermodurcissables	8
I.2.5.1.c Les matrices céramiques	9
I.2.5.1.d Les matrices métalliques	9
I.2.5.2 Renforts	10
I.2.5.2.a Fibre de verre	11
I.2.5.2.b Fibre de carbone	12
I.2.5.2.c Fibre céramique	13
I.2.5.2.d Fibre d'aramide	14
I.2.5.2.e Fibre synthétique	15
I.2.5.2 .f Autres types des fibres	15
I.2.5.3 Additifs	15
I.2.5.4 Géométrie des renforts	16
I.2.6 Architecture des matériaux composites	17
I.2.6.1 Monocouches	17
I.2.6.2 Stratifiés	18
I.2.6.3. Sandwich	19
I.3 Composites à matrice organique : les polymères	20
I.3.1. Principales différences entre les thermodurcissables et les thermoplastiques	22
I.3.2 Mécanismes de déformation des polymères	22

I.4	Les Bio-composites	27
I.5	Les Bio-polymères	28
I.6	Méthode de préparation des matériaux composites	29
I.7	Conclusion	31

Chapitre II comportement d'un matériau composite à matrice thermodurcissable

II.1	Introduction	32
II.2	Définition un matériau composite à matrice thermodurcissable	33
II.3	Loi de Hooke généralisée	34
II.3.1	Matériaux monocliniques	35
II.3.2	Matériaux orthotropes	36
II.3.3	Matériaux isotropes	37
II.3.4	Matériaux isotropes transverses	37
II.3.5	Matériaux quasi isotropes transverses	38
II.3.6	Matériaux quasi isotropes	39
II.4	Caractéristiques mécaniques du mélange renfort-matrice	40
II.5	Essai de traction	42
II.5.a	Traction Longitudinale	42
II.5.b	Traction transversale	43
II.5.c	Traction hors axes (essai de traction à 45°)	44
II.6	Essai de compression	45
II.7	Essai de flexion	46
II.7.a	Essai de flexion trois points	46
II.7.b	Essai de flexion quatre points	50
II.7.c	Essai de flexion par flambement	52
II.8	Essai de cisaillement	52
II.9	Essai de torsion tube	53
II.10	Essai de dureté	53
II.11	Essais dynamiques	55
II.11.a	Essai de résilience (choc)	55

II.11.b	Fatigue des composites	57
II.11.b.1	Fatigue et endurance	57
II.11.b.2	Les principales caractéristiques et propriétés impliquées dans le comportement en fatigue d'un polymère [45]	58
II.11.b.3	Paramètres généraux qui influent sur la tenue en fatigue	59
II.12	Analyse mécanique dynamique	61
II.13	Endommagement des composites	61
II.13.1	Les différentes échelles d'observation de l'endommagement	62
II.13.2	Modes de rupture	62
II.13.3	Les mécanismes d'endommagement	63
II.13.3.a	Rupture de fibre	64
II.13.3.b	Fissuration matricielle	64
II.13.3.c	Décohésion fibre-matrice	65
II.14	Fissurations des composites stratifiés	66
II.15	Facteurs influençant la résistance du composite	69
II.16	Conclusion	71

Chapitre III Etude expérimentale

III.a	Partie A	72
III.a.1	Introduction	72
III.a.1.1	Le Matériau composite	72
III.a.1.2	Matériau de renfort	72
III.a.1.3	Sciure	73
III.a.2	Contribution à la recherche et objectifs	74
III.a.3	Matériels et Méthodes	74
III.a.3.1	Ensemble 1	74
III. a.3.2	Ensemble II	76
III.a.3.3	Préparation des éprouvettes :	76
III.a.3.4	Méthode	81
III.a.4	Essai de traction	84

III.a.5	Résultat et discussion	85
III.a.5.1	Résultats de traction pour le premier ensemble Po / gf /sd 00	85
III.a.5.2	Résultats des essais de traction pour le 2 eme ensemble : Po / gf /sd 01	86
III.a.5.3	Résultats des essais de traction pour le 3 eme ensemble : Po / gf /sd 05	87
III.a.5.4	Résultats des essais de traction pour le 4 eme ensemble : Po / gf /sd 10	87
III.a.5.5	Les graphiques	88
III.a.5.6	Discussion et analyse	90
III.a.6	Conclusion	93
III.b	Partie B « Analyse statistique »	94
III.b.1	Introduction	94
III.b.2	Procédures expérimentales	94
III.b.3	Essais expérimentaux	97
III.b.4	Analyse statistique	98
III.b.5	Résultats et discussion	101
III.b.5.1	Équation de régression	101
III.b.5.2	Analyse de variance (ANOVA)	102
III.b.5.3	Analyse d'optimisation et validation du modèle	105
III.b.6	Conclusion	107
	Conclusion générale et perspectives	108
	Référence bibliographiques	111

Liste Des Figures

Figure I.1	Schéma de construction d'un matériau composite	4
Figure I.2	Structure interne d'un matériau composite	5
Figure I.3	Classement des matériaux composites	6
Figure I.4	Classification de renforcement selon la forme	7
Figure I.5	Types de matrice	8
Figure I.6	Types de renfort	10
Figure I.7	Les structures géométriques des composites	17
Figure I.8	Pli à Renforcement unidirectionnel	17
Figure I. 9	Constitution d'un stratifié	18
Figure I.10	Constitution d'un sandwich	19
Figure I.11	Les propriétés essentielles du sandwich	19
Figure I.12	Les Différentes types du sandwich	20
Figure I.13	Polymères à structure : (a) réticulée – (b) ramifiée	20
Figure I.14	Polymères à structure : (a) réticulée – (b) ramifiée Courbes charge -déformation différents polymères [EHR00] : (a) souple et peu résistant – (b) souple et ductile – (c) rigide fragile – (d) rigide et ductile	23
Figure I.15	Mécanisme de déformation plastique par cisaillement dans un polymère : (a) avant déformation – (b) après déformation	23
Figure I.16	Mécanisme de déformation des polymères amorphes lors d'une sollicitation unidirectionnelle : (a) état libre de contraintes – (b) déformation limitée (c) structure para-cristalline parfaitement alignée	24
Figure I.17	Mécanisme de déformation des polymères semi-cristallins lors d'une sollicitation unidirectionnelle	25

Figure I.18	Transformation structurale et représentation schématique des différentes zones lors de la déformation d'un polymère semi-cristallin	26
Figure I.19	Réponse caractéristique en traction d'un polymère thermoplastique semi-cristallin et évolution de la forme de l'éprouvette	27
Figure I.20	Classification des bio-composites	28
Figure I.21	Le cycle de vie des polymères biodégradables	29
Figure I.22	Le principe de méthode de moulage	30
Figure I.23	Différentes étapes de la formation des composites par moulage fermé	31
Figure II.1	Représentation des trois plans de symétrie d'un matériau orthotrope	36
Figure II.2	Structure élémentaire d'un matériau composite unidirectionnel	40
Figure II.3	Traction longitudinale	42
Figure II.4	Traction transversale	43
Figure II.5	Traction hors axes	44
Figure II.6	Obtention des éprouvettes unidirectionnelle et hors axe dans la plaque	45
Figure II.7	Essai de compression	46
Figure II.8	Dispositif d'essai et dimensions de flexion trois points	47
Figure II.9	Courbe de contrainte-déformation : 1) matériau fragile; 2) matériau ductile	48
Figure II.10	Représentation des contraintes internes d'une éprouvette sollicitée en flexion trois points	49
Figure II.11	Essai de flexion à quatre points	50
Figure II.12	Répartition des efforts sur la longueur d'une éprouvette sollicitée à une flexion quatre points	51
Figure II.13	Configuration de flambement	52
Figure II.14	Essai de torsion d'un tube	53
Figure II.15	Principaux essai de dureté	55
Figure II.16	Forme des éprouvettes en U et en V	56

Figure II.17	Essai de résilience	56
Figure II.18	Différents cas de sollicitations	58
Figure II.19	Schéma illustrant l'influence des paramètres sur le comportement en fatigue.[45]	59
Figure II.20	Schéma de fonctionnement de DMA [46]	61
Figure II.21	Les différentes échelles d'observation de l'endommagement: illustration sur un Matériau stratifié	62
Figure II.22	Différents modes de rupture	63
Figure II.23	Rupture de fibre	64
Figure II.24	Rupture de la matrice	65
Figure II.25	Modes de fissuration de la matrice	65
Figure II.26	Décohésion fibre-matrice.	66
Figure II.27	Différentes types de fissuration au sein d'un composite stratifié.	66
Figure II.28	Mécanismes de rupture dans les stratifiés	67
Figure II.29	Stratifié croisé soumis à une traction dans la direction 0°	68
Figure II.30	Rupture en présence d'un trou d'un composite $[0^\circ/90^\circ]$ 2S à fibres de carbone. (a) Rupture macroscopique au droit de trou. (b) Bord de l'éprouvette loin du trou : les couches à 90° sont micro-fissurées	68
Figure II.31	Stratifié croisé $\pm 45^\circ$ soumis à une traction dans la direction 0° .	68
Figure II.32	Rupture d'un composite $[\pm 45^\circ]$ 2S à fibres de carbone	69
Figure II.33	Effet de la longueur d'une fibre de verre E sur la résistance moyenne de la fibre	69
Figure II.34	Influence du diamètre des fibres de verre sur la résistance à la compression d'un composite.	70
Figure II.35	Corrélation entre la résistance au cisaillement du composite et le taux de porosité.	70

Figure II.36 Influence du taux de porosité sur la résistance à la Compression du composite à fibre de verre.	70
Figure III.1 Sciure de bois	73
Figure III .2 Balayage d'images au microscope électronique sciure de bois	74
Figure III .3 Matériau de renforcement "Fibre de verre"	75
Figure III.4 Moule en verre	76
Figure III.5 Balance électronique	78
Figure III.6 Rouleau métallique	82
Figure III.7 Échantillons de matériau composite	83
Figure III.8 Micrographies des composites : Po/gf/sd	83
Figure III.9 Machine d'essai Zwich Roell type Z 50 -50 KN.	84
Figure III.10 Résultats moyens en traction d'un renfort en matériau composite po% / gf% / sd% avec différentes proportions de sciure de bois.	88
Figure III.11 Résultats d'essais de traction pour un composite à base de polyester insaturé renforcé de fibres de verre po% /gf% / sd% avec des proportions changeantes de matrice-polyester insaturé.	89
Figure III.12 Résultats des essais de traction po%/ gf%/ sd% par po%	89
Figure III.13 Le dispositif expérimental de fabrication des plaques	95
Figure III.14 Type de fibres	95
Figure III.15 La géométrie et les dimensions de l'essai de traction	96
Figure III.16 Différentes périodes d'immersion en eau de mer au laboratoire	96
Figure III. 17 Machine de traction « Zwick/Roell Z050 » et logiciel « TestXpert »	98
Figure III.18 Diagrammes de probabilité normale des résidus pour R% de (a) , (b) et (c)	104
Figure III.19 Valeurs expérimentales et valeurs prédites pour (a) E, (b) Rm et (c) At	107

Liste Des Tableaux

Tableau I.1 Caractéristiques de quelques résines.	9
Tableau I.2 Caractéristiques mécaniques des fibres de verre types E et R.11	12
Tableau I.3 Caractéristiques mécaniques de fibre carbone HR et HM	13
Tableau I.4 Caractéristiques mécaniques de fibre céramique	14
Tableau I.5 Caractéristiques mécaniques de mono-filaments aramides	15
Tableau I.6 Principales différences entre les thermodurcissables et les thermoplastiques	23
Tableau II.1 Dimensions des éprouvettes pour les essais de flexion	48
Tableau II.2 Echelle de mesure	54
Tableau III. 1 Tableau de codage des états Rapports massiques résine polyester insaturé/masse fibre de verre	77
Tableau III. 2 Rapports massiques résine polyester insaturé % / renfort fibre de verre % .	78
Tableau III.3 Tableau de codage des états Rapports massiques de résine polyester insaturé/Masse de fibre de verre + 01% Masse de sciure	79
Tableau III.4 Rapports pondéraux du matériau en résine de polyester insaturé et du renfort en fibre de verre + 01 % en poids de sciure ajoutée.	79
Tableau III. 5 Table de codage des états Rapports massiques de résine polyester insaturé/Masse de fibre de verre + 05% Masse de sciure	80
Tableau III.6 Rapports pondéraux du matériau en résine de polyester insaturé et du renfort en fibre de verre + 05 % en poids de sciure de bois ajoutée	80
Tableau III.7 Table de codage des états Rapports massiques de résine polyester insaturé/Masse de fibre de verre + 10 % Masse de sciure	81
Tableau III.8 Rapports pondéraux du matériau en résine de polyester insaturé et du renfort en fibre de verre + 10 % en poids de sciure de bois ajoutée	81

Tableau III. 9	Résultats de la traction pour la première série.	86
Tableau III. 10	Résultats de résistance à la traction d'un matériau composite à base de polyester insaturé renforcé par des fibres de verre + 1 % de sciure de bois	86
Tableau III.11	Résultats de résistance à la traction d'un matériau composite à base de polyester insaturé renforcé par des fibres de verre + 05 % de sciure de bois.	87
Tableau III.12	Résultats de résistance à la traction d'un matériau composite à base de polyester insaturé renforcé de fibres de verre + 10 % de sciure de bois	87
Tableau III.13	Propriétés mécaniques des fibres et de la résine polyester	95
Tableau III.14	Épaisseur de l'échantillon	97
Tableau III.15	Facteurs de contrôle et leurs niveaux	98
Tableau III.16	Réseau orthogonal L32 de Taguchi.	99
Tableau III.17	ANOVA pour la variance du module de Young (E)	103
Tableau III.18	ANOVA pour la résistance maximale (Rm)	103
Tableau III.19	ANOVA pour l'allongement total (At)	104

Nomenclature :

CMM : Composites à Matrices Métalliques.

CMC : Composites à Matrices Céramiques.

CMO : Composites à Matrices Organiques.

CMP : Composites à Matrice Polymère.

TD: Thermodures ou thermodurcissable .

TP: Thermoplastiques

.PLA:(polylacticacid).

PHB: PolyHydroxy Butyrate.

PHBV: poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate).

DMSO: diméthylsulfoxyde.

AHG: d'anhydroglucose.

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

CNRC : Conseil National de Recherches du Canada.

ADEME : Agence de la transition écologique.

CEN : Comité européen de normalisation.

MEB : Microscope à balayage électronique.

SG : Matrices.

RF: Renfort.

PDF : Fonction de Densité de Probabilité ($f(k)$).

CDF : Fonction de Distribution Cumulative($F(k)$).

Pi : probabilité cumulée de défaillance.

AG : Algorithme Génétique.

OEP : L'optimisation par essai m de particule.

PSO: Particle swarm optimisation.

ρ : Masse Volumique en (Kg/m^3)

E : Module de Young en (GPa)

D : Densité (en g/cm^3).

Mf : Masse fibre en (g).

VI : Volume liquide en (cm^3).

Vt : Volume liquide +Volume fibre en (cm^3).

σ : contrainte normale ($\sigma > 0$) en M P a.

N : effort normal en Newton.

E : Module de Young ou bien le module d'élasticité longitudinal en M p a.

S : aire de la section droite (S) en mm^2 .

l':déplacement (mm).

l: longueur de référence (mm).

K c v : La résilience en J/cm^2 .

Pm: Poids (marteau+bras) en N.

S:la section nominale au droit de l'entaille en cm^2 .

Po : Polyester insaturé.

gf : fibre de verre

sd : sciure de bois

F : la contrainte maximale « Newton »

B : largeur de l'éprouvette exprimée en mm.

e : épaisseur de l'éprouvette exprimée en mm.

l :longueur de l'éprouvette exprimée en mm.



Introduction Générale



L'évolution des matériaux polymères est passée par le développement de composites à matrices organique renforcé par des charges telle que la fibre de verre. L'introduction de renfort permet d'améliorer les propriétés mécaniques et physiques de la matrice pour un coût de revient modéré.

Depuis plusieurs décennies, les matériaux composites, à matrice polymérique, sont l'objet de multiples travaux de recherche concernant leur résistance mécanique à divers types de sollicitations. Leurs lois de comportement présentent un intérêt fondamental, car elles guident les procédés de mise en forme et permettent de contrôler et d'optimiser les performances recherchées.

Le renforcement des polymères vise principalement à accroître certaines propriétés et à leur tête mécanique mais généralement au détriment d'autres paramètres.

Parmi ces matériaux nous trouvons le polyester comme étant un thermodurcissable très utilisé dans l'industrie.

Dans cette optique, ce travail de thèse constitue une contribution à la recherche d'une solution aux problèmes liés aux critères de choix d'un matériau composite.

Ce travail de recherche s'est articulé principalement sur la caractérisation mécanique d'un composite à matrice thermodurcissable et renforcé par des fibres de verre. Ce dernier élaboré à l'université de Skikda a été caractérisé essentiellement par essai de traction.

La caractérisation fine du composite (polyester + fibre de verre) en relation avec est le comportement mécanique est la partie traitée dans ce mémoire de thèse.

Les objectifs que nous nous sommes fixés pour mener à bien ce travail s'articule sur trois chapitres.

Dans un premier chapitre, une revue bibliographique sur les composites à matrices polymériques. Celle-ci permet de mettre en avant les intérêts d'une catégorie de classe de composite auquel nous nous sommes intéressés. Il s'agit également de décrire les relations structure propriétés mécaniques des polymères renforcés et à matrice thermodurcissables.

Le deuxième chapitre sera consacré à la description des matériaux étudiés, à leur mise en œuvre et aux technique expérimentales utilisées pour une bonne caractérisation mécanique.

L'élaboration et les techniques de caractérisation ainsi que l'étude d'optimisation ont fait l'objet du troisième chapitre.

Pour ce faire, ce dernier est divisé en deux grande parties :

La première partie a été consacré dans un premier temps, aux différentes techniques d'élaboration des différents matériaux réalisés dans ce travail de recherche et dans un second temps aux différentes techniques de caractérisation mécanique ainsi qu'à la présentation des principaux résultats trouvés et dégagés suite à cette étude.

Dans cette partie d'étude, nous avons présenté les différents échantillons élaborés à partir de polyester insaturé et renforcés par des fibres de verre avec différents taux en masse de sciure de bois.

L'essai de traction a été employé comme technique principale pour l'extraction des principales propriétés mécaniques.

La base de données expérimentales trouvées a été réservée, dans la deuxième partie du chapitre trois, pour faire une étude statistique et d'optimisation tout en s'appuyant sur l'analyse de variance (ANOVA) ainsi le modèle de Taguchi réduit.

L'étude menée à travers cette partie du troisième chapitre aborde les recherches appliquées pour étudier l'impact du temps d'immersion dans l'eau de mer et du nombre et des diamètres des couches de fibres sur les propriétés mécaniques du polyester insaturé et renforcé par deux types de fibres de verre dont les surfaces spécifiques sont respectivement : pour le type 'mat, aléatoire' de 300 g/m², 450 g/m² et 600 g/m² et pour le type 'tissu, roving' 500 g/m².

L'effet du nombre de couche ainsi que celui du milieu environnant 'par immersion des éprouvettes dans l'eau de mer (3, 21 et 30 jours) a été évoqué également dans cette partie d'étude.

Enfin, la conclusion générale et les différentes perspectives que l'on peut donner à ce travail sont exposées à la fin du manuscrit.

Généralités sur les

Chapitre I

Matériaux

I.1 Introduction :

Les plastiques sont actuellement considérés comme les matériaux les plus utilisés et polyvalents de notre époque, et la production mondiale a considérablement augmenté pour répondre à la demande croissante. L'utilisation de matériaux plastiques dans les industries automobile et aéronautique permet de réaliser des économies de poids et donc de carburant. Dans la construction, les plastiques offrent de bonnes qualités d'isolation, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie. Toutefois, il faut rappeler que les matériaux en plastique sont issus de matières premières pétrochimiques.

Les polymères biodégradables sont un type particulier de polymères qui se décomposent en fin de vie en sous-produits tels que le dioxyde de carbone, l'oxyde d'azote, l'eau et les sels minéraux.

Ils sont souvent synthétisés par des réactions sous pression, une polymérisation en boucle ouverte et des catalyseurs métalliques. L'utilisation de bioplastiques biodégradables a attiré beaucoup d'attention en raison de leurs propriétés respectueuses de l'environnement, de leur grande variété et disponibilité, de leur non-toxicité et de leur faible coût. Dans l'industrie automobile et d'autres secteurs, on utilise fréquemment des polymères biodégradables pour diminuer le volume de déchets d'emballages.

Le chapitre vise à fournir une revue bibliographique des composites, en examinant à la fois les matrices et les renforts, ainsi que les polymères, leur composition, leurs différentes typologies et leurs divers domaines d'application. L'objectif est de définir la terminologie et les concepts, et de développer nos connaissances sur les matériaux composites.

I.2 Les matériaux composites

I.2.1 Historique des matériaux composites

Au XVI^e siècle avant J.-C., les bâtisseurs de Mésopotamie ont été les premiers à utiliser des matériaux composites en mélangeant de la boue et de la paille pour construire des bâtiments solides et durables.

Les Mongols ont inventé le premier arc composite en utilisant un mélange de bois, d'os et de colle animale au XIII^e siècle, ce qui leur a permis de devenir une force militaire puissante.

Les résines naturelles dérivées d'animaux et de plantes étaient la seule option disponible avant que les scientifiques ne découvrent d'autres sources de liants et de colles.

Dans les années 1930, on a introduit les premières fibres de verre en combinaison avec un polymère plastique, marquant ainsi le début de l'industrie des polymères renforcés par des fibres (PRF) telle que nous la connaissons aujourd'hui.

Grâce à l'utilisation de fibres de renforcement, telles que les fibres de verre, les PRF sont renforcés et deviennent plus rigides.

I.2.2 Définition d'un matériau composite

L'association de deux ou plusieurs matériaux distincts permet la création d'un matériau composite. En manipulant des matrices et des renforts, il devient possible de générer un nouveau matériau hétérogène doté de caractéristiques variées et inédites. La matrice absorbe les contraintes mécaniques, tandis que les additifs de renforcement confèrent des propriétés supérieures à celles de la matrice. Cela se réalise en facilitant le déplacement des charges et en assurant l'alignement ainsi que la cohésion des fibres. Par ailleurs, les renforts présentent des propriétés mécaniques élevées, telles que la résistance mécanique et les modules d'élasticité.

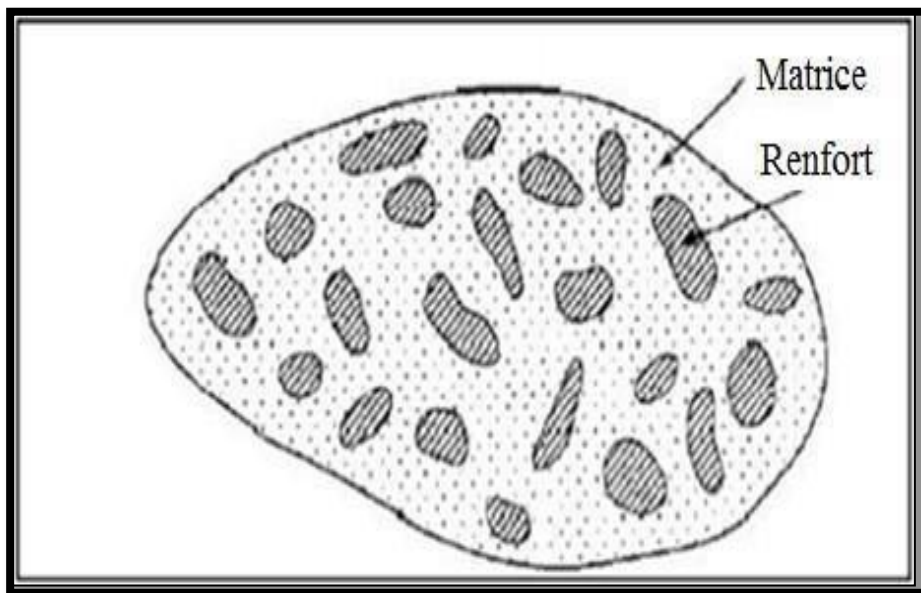


Figure I.1 Schéma de construction d'un matériau composite

La classification des renforts dépend de leur composition (naturels, verre, métal, carbone), de leur disposition (tissus ou mat), ainsi que de leur forme (particules ou fibres). Les fibres continues sont les renforts les plus couramment utilisés dans l'industrie des composites car ils assurent principalement la rigidité du matériau composite. La conception d'un matériau composite repose sur la sélection de la disposition, des dimensions et de la forme des renforts, ainsi que sur le choix des composants et de leurs proportions, ce qui conduit à la création d'un matériau ayant des propriétés spécifiques recherchées, qui doivent être supérieures à celles des composants individuels (comme illustré dans la Figure I.2).

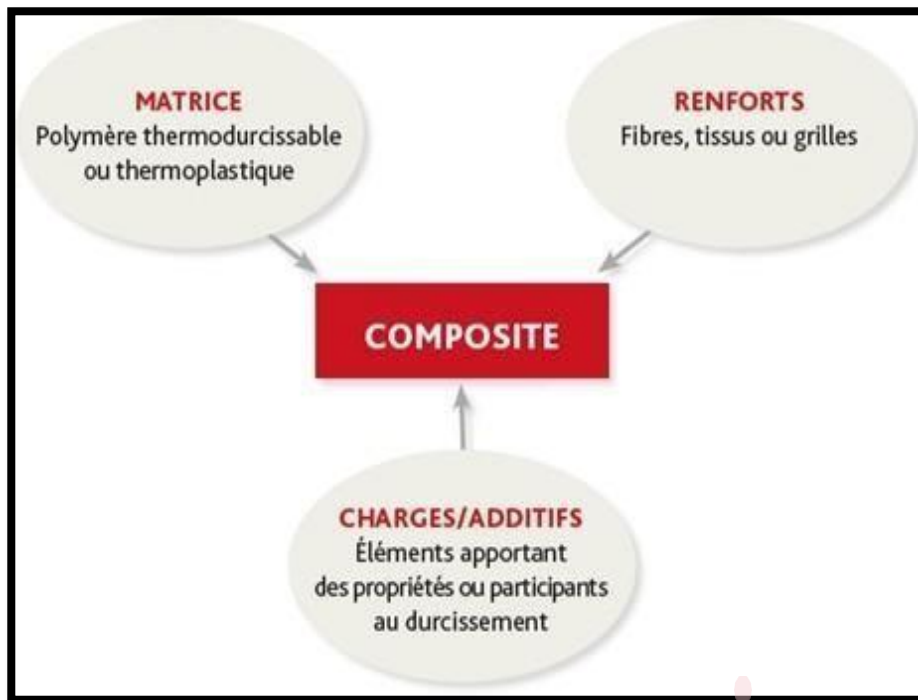


Figure I.2 Structure interne d'un matériau composite [2]

I.2.3 Les matériaux composites et les différents domaines d'utilisation

Grâce à leurs composants, les matériaux composites présentent une grande adaptabilité aux différents environnements, même s'ils sont complexes et agressifs chimiquement.

En termes de mécanique, les matériaux composites présentent d'excellentes capacités de résistance, à la compression, la traction, le cisaillement, la flexion, l'absorption des chocs ainsi que la capacité d'absorption des chocs sont pris en compte.

Ses applications les plus importantes sont liées à la production de carrosseries pour camions et à l'utilisation de certaines machines, telles que les bateaux de pêche, les structures et pièces, les réservoirs et les réservoirs d'eau, ainsi que la recherche tactile... etc.

I.2.4 Types de matériaux composites

On peut classer les matériaux composites selon deux niveaux distincts [1].

I.2.4.1 Selon la nature des composants :

Il y a plusieurs niveaux dans le classement des matériaux composites, y compris les matériaux composites à matrices métalliques (CMM), les matériaux composites à matrices céramiques (CMC) et les matériaux composites à matrices organiques (CMO), qui sont eux-mêmes divisés en deux classes : les composites carbonés, également connus sous le nom de composites carbone-carbone, et les composites à matrice polymère (CMP) [1].

I.2.4.2 Selon la forme du renfort :

On peut classer les matériaux composites en fonction de leur structure sous trois types : les composites lamellaires, les composites particulaires et les composites renforcés de fibres (CRF). Ces derniers peuvent être subdivisés en composites à fibres continues ou à fibres discontinues (voir Figure I.3).

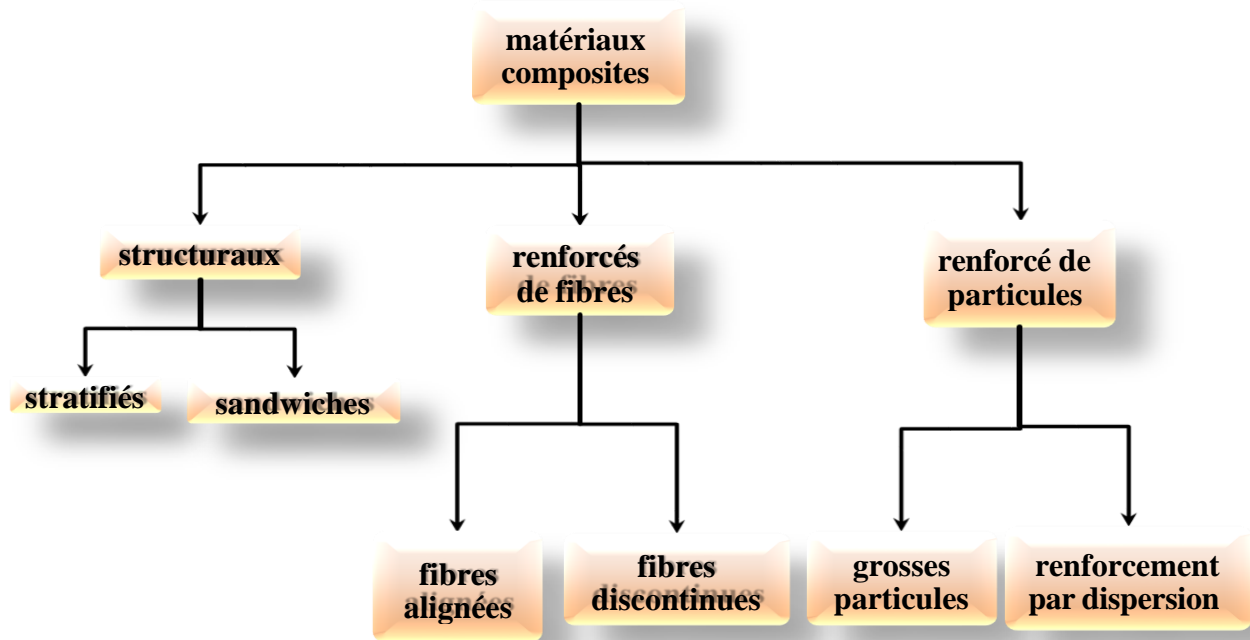


Figure I.3 Classement des matériaux composites [3]

I.2.4.2.a Composés laminaires : Les structures formées par l'assemblage de matériaux maintenus ensemble par une matrice sont désignées sous le terme de composés, englobant également les structures isolantes.

I.2.4.2.b Composites renforcés de fibres : Les composites renforcés de fibres sont produits en mélangeant des fibres à une matrice. Si les propriétés des fibres diffèrent en fonction de leur longueur, on les classe comme étant soit courtes, soit à renfort discontinu.

Toutefois, si leurs propriétés ne fluctuent pas en fonction de la longueur des fibres, on les considère comme des composites renforcés de manière continue [1].

I.2.4.2.c Particules composites : Cette catégorie de matériaux composites est constituée de particules dispersées dans une matrice, soit sous forme de poudre, soit de flocons. Des exemples de cette catégorie comprennent les panneaux de particules de bois et de béton.

Les matériaux composites courants peuvent être classés en fonction de la forme de leur renforcement. Cette classification inclut les composites à particules, les composites à fibres discontinues, et les composites à fibres continues.

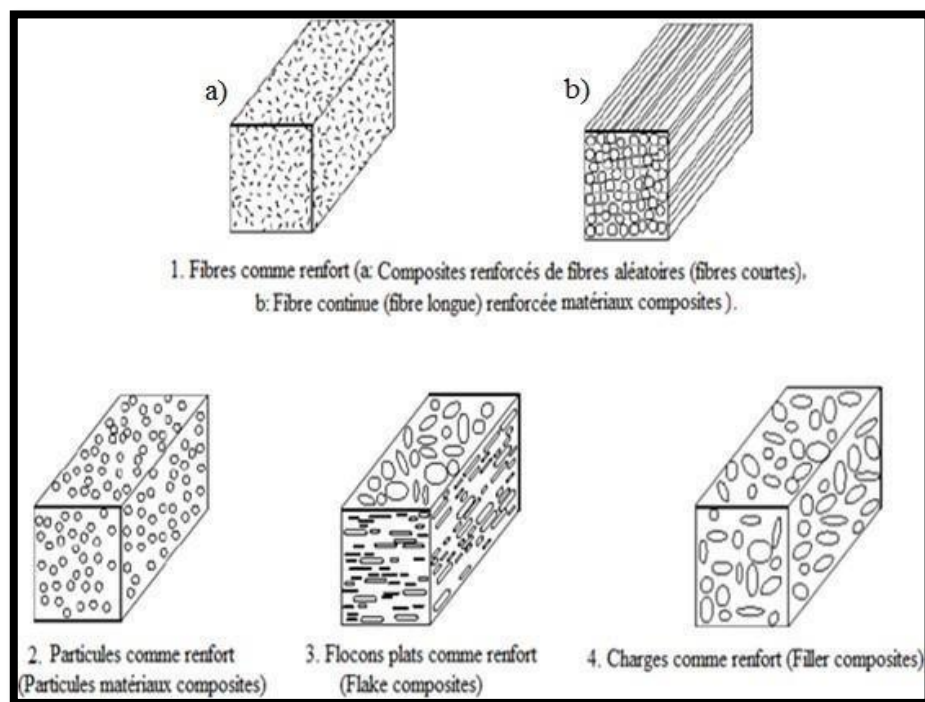


Figure I.4 Classification de renforcement selon la forme [1].

I.2.5 Eléments constituant un matériau composite

1.2. 5.1 Matrice

Les matériaux composites sont généralement constitués d'une matrice, qui est le plus souvent une résine polymère. Les résines polymères sont très variées et chaque type a un domaine d'utilisation spécifique [4]. Dans l'industrie, il existe deux types de résines organiques : les thermodurcissables (TD) et les thermoplastiques (TP). Les thermodurcissables sont les plus utilisées actuellement, mais les progrès de la recherche sur les résines thermoplastiques font que leur part dans la production mondiale de matériaux composites ne cesse d'augmenter [5].

Le rôle de la matrice est de lier les fibres entre elles et de maintenir l'alignement des directions principales sous contrainte. Elle permet également de transférer les contraintes qui sollicitent le matériau aux fibres, permettant ainsi au composite de résister aux efforts de compression, de cisaillement et de flexion, ainsi qu'aux efforts de traction et d'avoir une bonne absorption des chocs. L'efficacité de ce transfert de charge est directement liée à la qualité de la liaison matrice/fibre [6]. Les types de matrices couramment rencontrées sont classés dans la figure I.5.

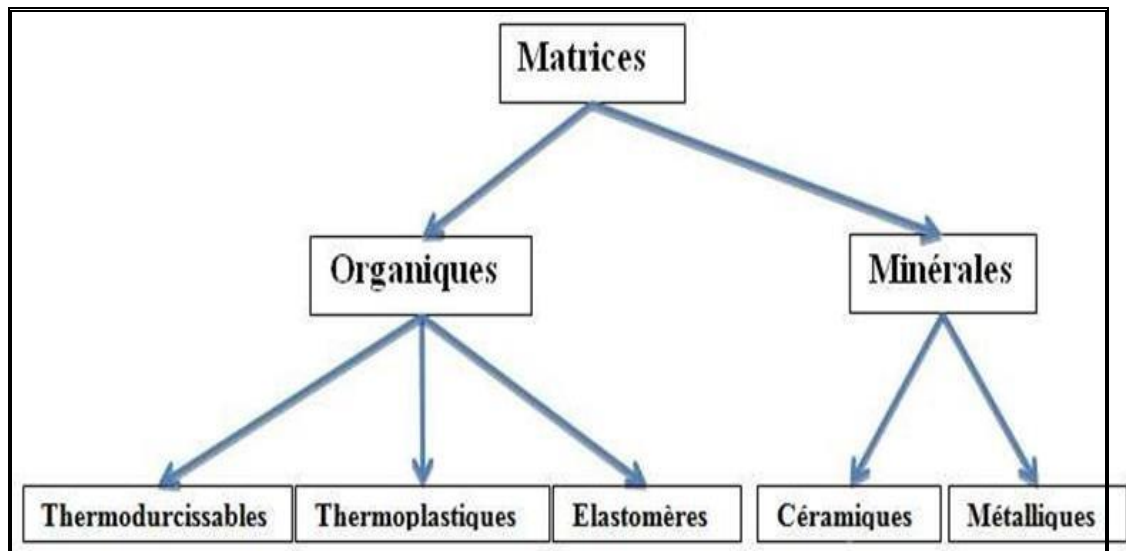


Figure I.5 Types des matrices.

I.2.5.1.a Les matrices thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des polymères qui, lorsqu'ils sont chauffés, deviennent mous ou fondus et peuvent être façonnés à volonté avant de revenir à leur état solide initial, sans altérer leurs propriétés intrinsèques. Ils peuvent être retravaillés, réutilisés et recyclés plusieurs fois en étant chauffés et refroidis à plusieurs reprises. Les polymères thermoplastiques sont largement utilisés dans diverses industries telles que l'aérospatiale, la construction, l'automobile, etc. et représentent environ 80% de la consommation totale de plastique. Les thermoplastiques les plus courants comprennent le poly (chlorure de vinyle) pour la fabrication de tuyaux, le polypropylène pour les boîtes alimentaires ou les revêtements de sol, le polyéthylène pour les bouteilles, jouets et sacs de supermarché, le polystyrène pour les contenants alimentaires, le poly (acétate de vinyle) pour les adhésifs, etc. Leur réversibilité thermique et recyclabilité sont des avantages clés qui leur confèrent une importance croissante de nos jours.

I.2.5.1.b Les matrices thermodurcissables

Les polymères thermodurcissables sont obtenus à partir de pré-polymères de faible poids moléculaire qui sont réticulés sous l'effet de la chaleur en présence de durcisseurs et de catalyseurs [2]. Contrairement aux polymères thermoplastiques, ils ne fondent pas lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées et ne peuvent pas être reformés après leur fabrication en raison d'une réaction chimique. Par conséquent, leur recyclage est difficile. La dégradation de ces polymères est principalement due à la rupture des liaisons covalentes entre les chaînes, nécessitant une grande quantité d'énergie pour être rompue, et est généralement due à une élévation continue de la

température. Ils sont souvent insolubles dans les solvants courants. Les résines phénoliques, les époxydes, les polyesters, les polyuréthanes, etc., sont des exemples courants de polymères thermodurcissables utilisés dans de nombreux domaines tels que la construction, l'automobile, l'aérospatiale, etc. Ils présentent des avantages importants tels que la résistance à la corrosion, à l'impact, à la fatigue et une longue durée de vie (Tableau I.I) [3].

Résine	Densité ρ	E(GPa)	σ_r (MPa)	Tmax(°C)
Epoxyde	1.2	4.5	130	90-200
Uréthane	1.1	0.7-7	30	100
Polyester insaturé	1.2	4	80	60-200
Urée formaldéhyde	1.2-1.5	6-10	40-80	140
Phénol formaldéhyde	1.1-1.3	3-4	35-60	80-300

Tableau I.1 Caractéristiques de quelques résines [7].

I.2.5.1.c Les matrices céramiques

Les céramiques sont des matériaux essentiellement inorganiques et non métalliques qui sont formés par fusion et solidification ou par l'action de la chaleur [8]. Elles peuvent être composées d'oxydes, de carbures, de nitrures et de borures, et présentent des liaisons chimiques fortes de nature ionique ou covalente [9]. Les composites à matrice céramique présentent de nombreux avantages, tels qu'une résistance élevée, une faible densité, une grande résistance à la plupart des attaques (abrasion, usure, corrosion) et une résistance à haute température [10].

I.2.5.1.d Les matrices métalliques

Les métaux sont des matériaux cristallins ayant une grande polyvalence en ingénierie. Ils sont à la fois durs et résistants, tout en étant malléables pour être déformés selon les besoins. Les métaux peuvent également être renforcés de différentes manières. Les composites à matrice métallique, quant à eux, sont composés d'un alliage ou d'un métal agissant comme matrice continue et d'un renfort constitué de fibres courtes, continues, de filaments ou de particules [11]. Bien que les

composites à matrice métallique existent depuis longtemps, leur reconnaissance en tant que matériau composite d'ingénierie légitime remonte à la seconde moitié du XXe siècle [12]

I.2.5.2 Renforts

Le renfort est l'élément qui supporte les charges mécaniques [13] ; les renforts constituent la composante la plus importante des composites, car ils contribuent principalement à leur résistance [14].

Les fibres sont la forme de renforcement la plus efficace, car elles transmettent des contraintes plus élevées et plus rigides à travers la matrice, qui est souvent plus souple, produisant ainsi un matériau composite qui présente des propriétés supérieures à celles du matériau de la matrice [15].

L'utilisation de fibres pour renforcer les matériaux fragiles remonte à l'époque égyptienne, lorsque les pots en argile étaient renforcés avec des fibres d'amiante il y a environ 5000 ans [16]. Les fibres peuvent être classées en fonction de leur nature : minérales, polymères ou naturelles [17].

Les renforts (fibres) peuvent également être classés selon leur forme : courte, longue ou continue, ainsi que selon leur disposition : mate ou tissée [13].

La figure I.6 présente la classification des types de renforts couramment utilisés.

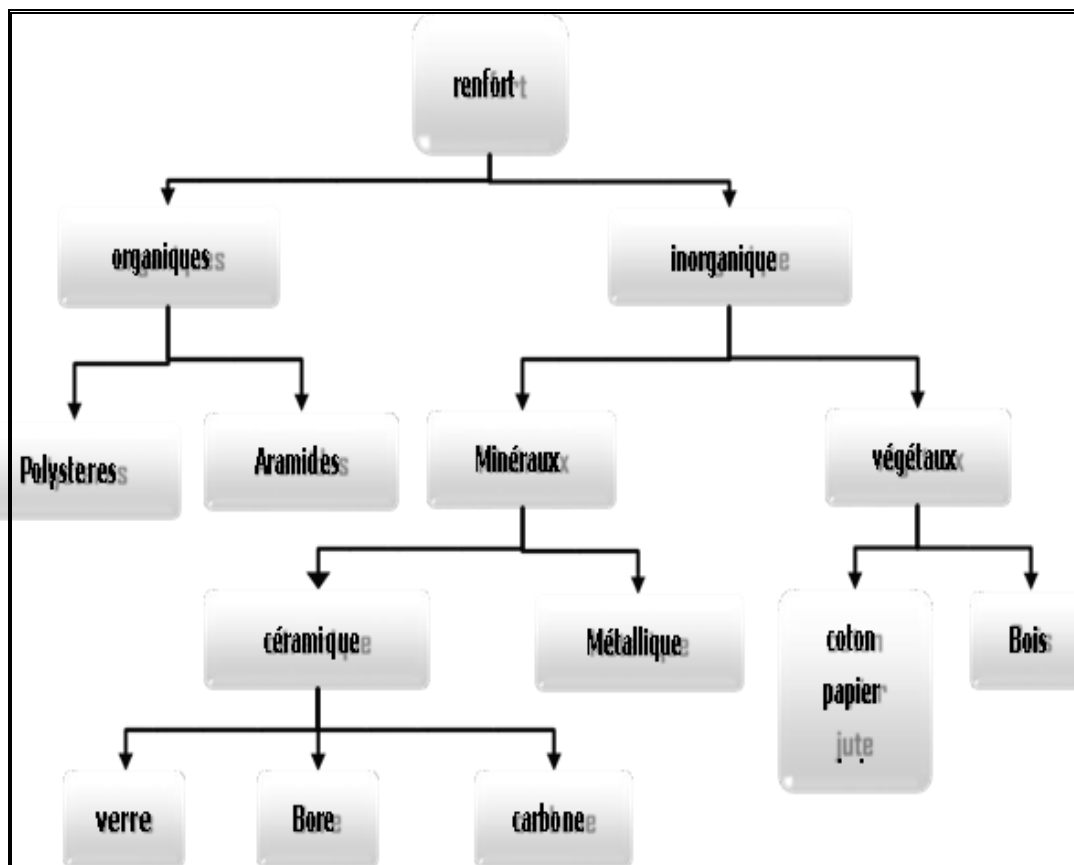


Figure I.6 Types de renfort [5].

I.2.5.2.a Fibre de verre

Les fibres de verre sont produites en modifiant la composition de matières premières telles que l'argile pour l'alumine, la colémanite pour l'oxyde de bore, le sable pour la silice et la calcite pour l'oxyde de calcium. Cette modification de la composition permet à chaque type de fibre de verre d'avoir des propriétés différentes telles que des propriétés mécaniques élevées ou une résistance aux alcalis. Les produits en fibre de verre sont classés selon le type de composite dans lequel ils sont utilisés (E-verre : verre électrique, C-verre : verre chimique, D-verre : verre diélectrique...). La production de la fibre de verre a commencé depuis l'antiquité, mais la fabrication de masse a commencé en 1893 par Edward Drummond Libby qui exposait une robe faite d'un tissu combinant soie et fibre de verre. En 1938, le premier brevet relatif à la production de laine de verre a été délivré par Russell Games Slayter.

Par la suite, la fibre de verre a commencé à être utilisée comme renfort pour les matériaux composites, notamment sur les navires de guerre de la marine américaine comme isolants pendant la Seconde Guerre mondiale. Les résines synthétiques ont également joué un rôle important dans les plastiques renforcés, avec les phénols occupant une place importante en raison de leur résistance au feu et de leur faible coût. La fibre de verre a été utilisée pour la première fois en série en 1953 par General Motors pour la production de la carrosserie en fibre de verre de la voiture de sport .

I.2.5.2.a.1 Propriétés mécaniques des fibres de verre

Caractéristiques	Fibre de Verre E	Fibre de Verre R
Masse volumique (kg/m³)	2 600	2 550
Module d'Young (GPa)	73	86
Contrainte à la rupture (MPa)	3 400	4 400
Allongement à la rupture (%)	4,4	5,2
Coefficient de Poisson	0,22	–

Tableau I.2 Caractéristiques mécaniques des fibres de verre types E et R.

I.2.5.2.b Fibre de carbone

Les fibres de carbone sont des fibres composées d'au moins 90% de carbone et sont produites en chauffant des fibres organiques à faible teneur en carbone telles que le polyacrylonitrile (PAN) qui contient des milliers de filaments de 5 à 10 μm de diamètre. Ces fibres se distinguent des autres fibres par leur dureté et leur résistance à la traction élevée, leur faible densité et leur résistance chimique élevée. Associées à un matériau de matrice approprié tel qu'une résine polymère, ces avantages peuvent être combinés pour créer des composites avec des propriétés mécaniques exceptionnelles et un poids léger. Les principales applications de ces polymères renforcés de fibres de carbone sont dans l'aérospatiale et le génie civil, les sports, les loisirs, les éoliennes et la défense. Ces fibres ont également connu une croissance significative dans l'industrie automobile pour la fabrication de structures légères visant à réduire la consommation d'énergie. Les premières fibres de carbone produites commercialement à très haute teneur en carbone ont été fabriquées à partir de fibres naturelles telles que le bambou ou le coton. Ces fibres ont été utilisées dans les ampoules comme filaments pour lampes il y a environ 100 ans.

Dans les années 1950, Union Carbide Corporation a réalisé les premiers travaux structurés sur des fibres de carbone haute performance fabriquées à partir de tissus PAN à module élevé et à haute résistance à la traction. À partir de la fin des années 1970, des fibres de carbone améliorées telles que la T300 de Toray ont été développées avec une résistance à la traction de 4000 MPa et un module de 400 GPa.

I.2.5.2.b.1 Propriétés mécaniques des fibres de carbone

La fibre de carbone a un module élastique élevé, de 200 à 800 GPa. L'allongement ultime est de 0,3 à 2,5 % (tableau I.3). La fibre de carbone n'absorbe pas l'eau et résiste à de nombreuses solutions chimiques. En outre, elle offre une excellente résistance à la fatigue et une relaxation inférieure à celle de l'acier extensible précontraint. La fibre de carbone est un conducteur électrique.

Caractéristiques	Carbone HR	Carbone HM
Masse volumique (kg/m^3)	1 750	1 810
Diamètre (μm)	5 à 7	5 à 7
Module d'Young (GPa)	230	400
Module spécifique (MNm/kg)	130	210
Contrainte à la rupture (MPa)	3 000–4 000	2 800
Contrainte spécifique (kNm/kg)	1 710–2 290	1 550

Tableau I.3 Caractéristiques mécaniques de la fibre carbone HR et HM [2]

I.2.5.2.c Fibre céramique

Les céramiques sont des composés inorganiques non métalliques qui contiennent une grande quantité de phases cristallines ou entièrement cristallines. Les fibres céramiques, qu'elles soient oxydes ou non oxydes, sont utilisées dans les applications à haute température en raison de leur résistance aux chocs thermiques, leur température de fusion et de décomposition élevée et leur faible densité qui résulte de la porosité typique des fibres d'oxyde. Ces matériaux offrent une haute résistance et une tolérance aux dommages, ce qui les rend précieux pour des applications structurelles résistantes à la chaleur, telles que l'automobile et l'aérospatiale. Les fibres céramiques discontinues (courtes en longueur) sont fabriquées par filage à l'état fondu, alors que les fibres céramiques continues (longues) à base d'alumine et de silicates sont fabriquées par le procédé sol-gel. En outre, les fibres céramiques non oxydantes à base de silicium et de bore sont actuellement en cours de développement et de production par conversion thermique du procédé précurseur de polymère.

I.2.5.2.c.1 Propriétés mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des diverses fibres sont assez voisines (par Exemple, tableau 1.4).

Caractéristiques	Bore	Bore + B4C	SiC
Masse volumique (kg/m ³)	2 600	2 600	3 000
Diamètre (µm)	100–150	100–150	100–150
Module d'Young (GPa)	430	430	410
Module spécifique (MNm/kg)	165	165	140
Contrainte à la rupture (MPa)	3 800	4 000	3 900
Contrainte spécifique (kNm/kg)	1 460	1 540	1 300

Tableau I.4 Caractéristiques mécaniques de la fibre céramique [2]

I.2.5.2.d Fibre d'aramide

Les fibres d'aramide sont des polyamides obtenus par la réaction d'un groupe aminé avec un

groupe carboxyle. Comparés aux arrangements linéaires d'atomes, les polyamides sont considérés comme plus stables grâce à la présence de cycles aromatiques. Les fibres d'aramide, comme le Kevlar qui est une fibre à haute résistance, et résistante à la chaleur, se caractérisent par leur dureté, leur résistance et leur légèreté. On les emploie pour renforcer les pneumatiques, certains plastiques, et dans la production de divers articles tels que les composites, les équipements de protection, ainsi que les cordes et les câbles.

I.2.5.2.d.1 Propriétés mécaniques de fibre d'aramide

Caractéristiques	Kevlar 29	Kevlar49	Kevlar149
Masse volumique(kg/m ³)	1 440	1 450	1 470
Diamètre (µm)	12	12	12
Module d'Young (GPa)	60	120	160
Module spécifique (MNm/kg)	42	83	110
Contrainte à la rupture (MPa)	3 000	3 000	2 400
Contrainte spécifique (kNm/kg)	2 080	2 070	1 630
Allongement à la rupture (%)	3,6	1,9	1,5

Tableau I.5 Caractéristiques mécaniques du mono-filament aramide [2].

I.2.5.2.e Fibre synthétique

Les produits fibreux sont fabriqués à partir d'une large gamme de fibres synthétiques (issues du charbon et du pétrole), les plus courantes étant les fibres de polyester, de nylon, d'acrylique et de polypropylène. Les fibres synthétiques offrent aux concepteurs de produits en fibres une variété infinie de choix pour obtenir les propriétés mécaniques et autres propriétés souhaitées, grâce à leurs différentes valeurs de durabilité. Elles sont considérées comme les fibres les plus performantes en termes de récupération élastique et de stabilité dimensionnelle. Par exemple, les fibres de nylon ont différentes valeurs d'étirage, qui conduisent à différents niveaux de résistance et d'allongement, ce qui est important pour les produits tels que les tapis et les moquettes. La fibre de polyester, qui est un polymère synthétique à longue chaîne, est produite par filage en fusion et possède d'excellentes propriétés d'allongement et de résistance. Elle peut être mélangée de manière efficace et efficiente avec du coton pour fournir une grande part de marché dans les vêtements et les produits ménagers.

Cependant, elle a une élasticité 3 % inférieure à celle du nylon, ce qui rend le polyester plus couramment utilisé dans les vêtements durables, tandis que le nylon est plus couramment

utilisé dans les produits transparents tels que les bas pour femmes.

1.2.5.2.f Autres types des fibres

Les fibres suivantes ont un module d'élasticité relativement faible par rapport à celles mentionnées précédemment et sont principalement utilisées dans des applications spécifiques, telles que des papiers spéciaux pour une bonne conductivité électrique.

- Les fibres d'origine minérale (silice, amiante).
- Les fibres d'origine végétale (chanvre, cellulose, lin, etc.).
- Les fibres polymères (notamment le nylon, un polyamide).

Ces fibres ont des caractéristiques importantes telles que :

- Leur prix de revient relativement bas.
- Leur haute capacité d'isolation thermique.
- Leur bonne conductivité électrique et thermique.
- Leur propriété d'isolation acoustique.

Les fibres minérales ont une résistance et un module d'élasticité élevés, ainsi que de bonnes propriétés de liaison. Les fibres polymères sont également solides et ont de bonnes propriétés de liaison, ce qui en fait une alternative solide aux fibres minérales. Les fibres naturelles sont relativement résistantes mais ont des propriétés de liaison relativement plus faibles que les fibres minérales et polymères

1.2.5.3 Additifs

Les additifs aux matériaux composites sont des substances ajoutées lors de la fabrication des composites pour améliorer certaines propriétés ou faciliter le processus de fabrication. Voici quelques exemples courants d'additifs utilisés dans les matériaux composites :

- Agents de renforcement : Les fibres de renforcement, telles que les fibres de carbone, les fibres de verre ou les fibres aramides, sont souvent ajoutées pour augmenter la résistance mécanique du matériau composite.
- Agents de liaison : Ces additifs améliorent l'adhésion entre les fibres de renforcement et la matrice, assurant ainsi un meilleur transfert des charges entre les deux composants. Des agents de liaison couramment utilisés comprennent les résines époxy, les résines polyester et les résines vinylester.
- Agents antistatiques : Ces additifs réduisent l'accumulation d'électricité statique dans les composites, ce qui peut être important dans certains environnements sensibles.
- Agents ignifuges : Pour augmenter la résistance au feu des composites, des additifs ignifuges tels

que les retardateurs de flamme peuvent être utilisés. Ces additifs retardent la propagation des flammes et réduisent la combustibilité du matériau composite.

Agents antioxydants : Ils sont ajoutés pour protéger les composites contre la dégradation causée par l'exposition aux rayons UV ou à d'autres agents oxydants.

-Agents de coloration : Des pigments ou des colorants peuvent être utilisés pour donner une couleur spécifique au matériau composite.

-Agents lubrifiants : Ils améliorent les propriétés de transformation des composites lors de la fabrication, réduisant ainsi les frottements entre les composants et facilitant le moulage.

Il est important de noter que la sélection des additifs dépend des exigences spécifiques du matériau composite et de son application prévue. Différents types d'additifs peuvent être utilisés en combinaison pour obtenir les propriétés souhaitées dans le matériau composite final.

Afin d'améliorer les propriétés mécaniques des matériaux composites, il est possible d'incorporer des charges sous forme de liquides ou de poudres (minérales, végétales ou synthétiques) dans la résine. Pour réduire les coûts de la matrice en résine, des charges non renforcées peuvent également être utilisées. Les additifs tels que les colorants ou les agents de démoulage sont également couramment utilisés dans la conception de structures en matériaux composites [3,4].

I.2.5.4 Géométrie des renforts

Sur le plan géométrique, les renforts utilisés dans les matériaux composites peuvent être classés en trois types principaux :

Les fibres longues, dont la longueur est comparable aux dimensions de la pièce (Figure I.7.a). Les fibres courtes, dont la longueur est courte par rapport aux dimensions de la pièce (Figure I.7.b).

Les charges renforçantes, ou particules (Figure I.7.c).

Ces renforts sont intégrés dans une matrice qui répartit les contraintes entre eux et les protège contre les agressions extérieures, comme expliqué précédemment. Si le renfort est une fibre, il peut être disposé de manière aléatoire ou orienté dans une direction précise [18].

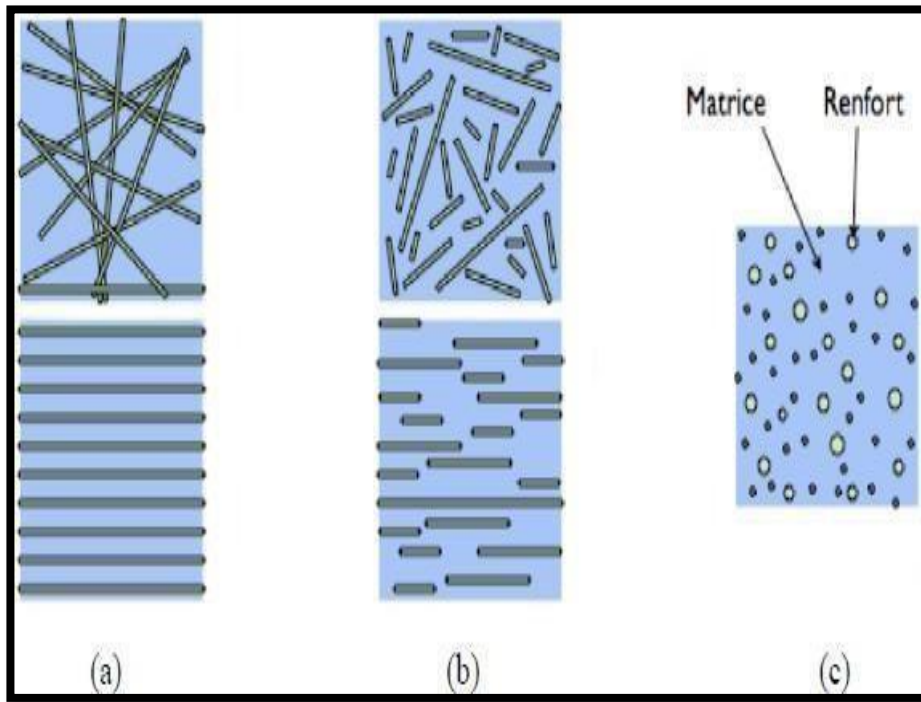


Figure I.7 Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules [18].

I.2.6 Architecture des matériaux composites

I.2.6.1 Monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite.

Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles (figure I.7), réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes [6].

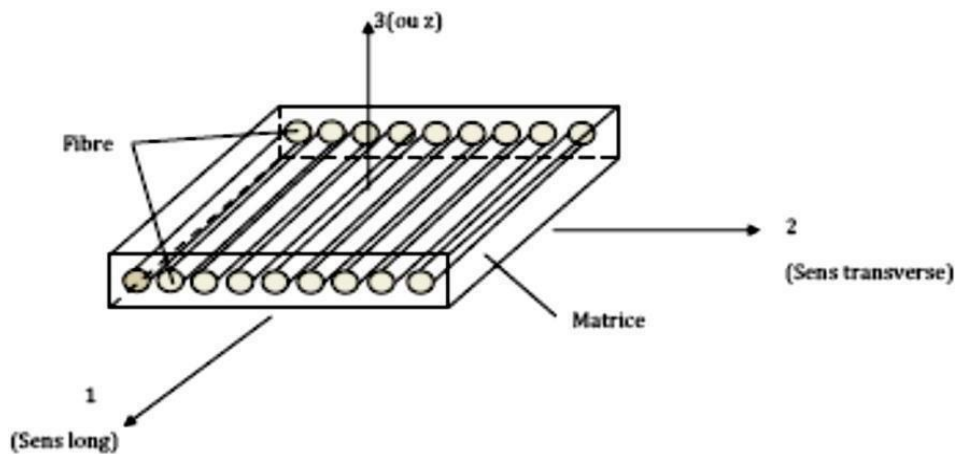


Figure I.8 Pli à renforcement unidirectionnel

I.2.6.2 Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacune une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches, et désigné comme le référentiel du stratifié (Figure I.8.) [5].

Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

On pourra avoir des stratifiés du type :

- Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction $+\theta$ que de couches orientées suivant la direction $-\theta$.
- Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
- Antisymétrique : stratifié comportant des couches disposées non symétriquement par rapport à un plan moyen.
- Croisé : stratifié comportant autant de couches à 0° que de couches à 90° .
- Hybride : les couches successives comportent des fibres de natures différentes, il s'agit d'un stratifié hybride.

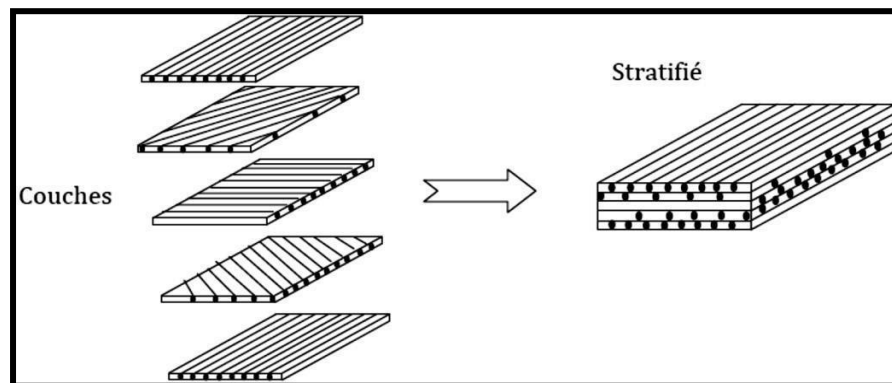


Figure I. 9 Constitution d'un stratifié.

I.2.6.3. Sandwich

Les matériaux sandwich résultent généralement de l'association de deux semelles ou peaux de faible épaisseur, constituées de deux matériaux à haute résistance et haut module et d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible densité (figure I.9).

Ils ont pour avantages : une grande rigidité, une résistance à la rupture élevée associées à un faible poids par unité de surface. Malgré une activité de recherche et de développement sur ces matériaux, le comportement au cours de l'endommagement reste peu connu.

Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et constitue un excellent isolant thermique (figure I.10). [7]

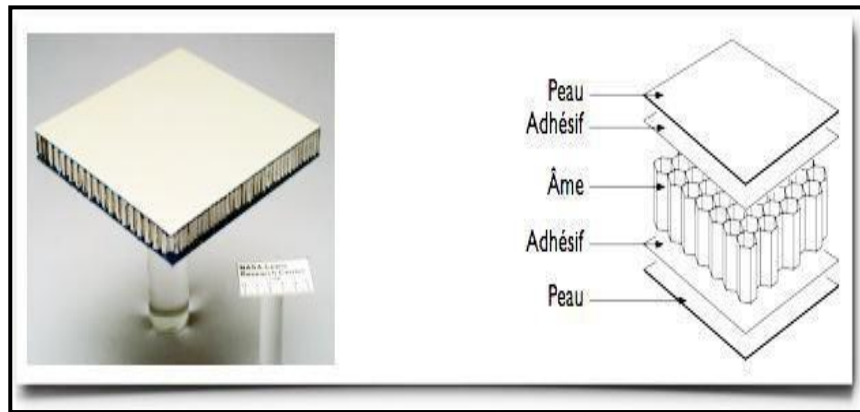


Figure I.10 Constitution d'un sandwich [6]

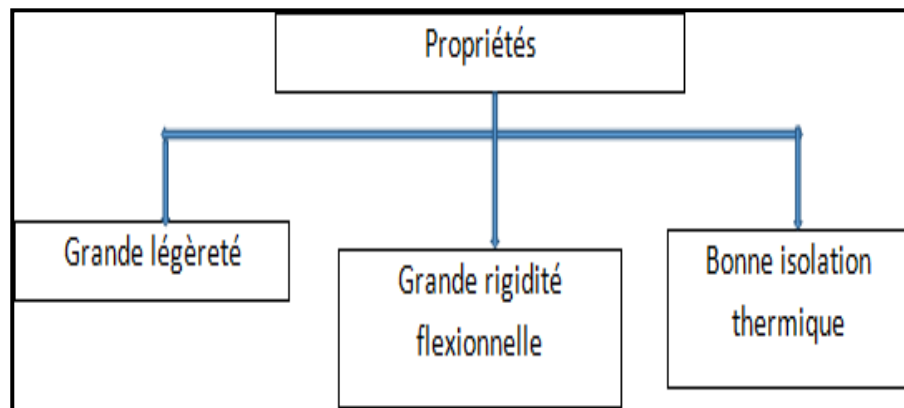
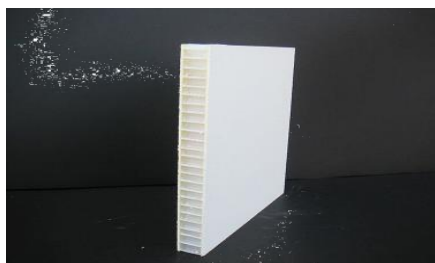


Figure I.11 Les propriétés essentielles du sandwich

- **Différents types de sandwich :**

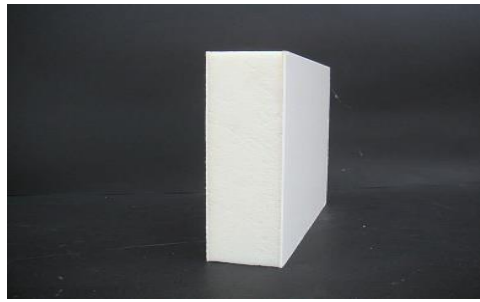
Ces derniers sont illustrés sur la Figure I.12



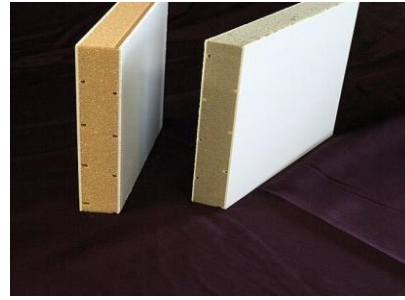
Fibre de verre nid d'abeille



Fibre de carbone nid d'abeille



Fibre de verre mousse polyuréthane



Fibre de verre mousse PVC

Figure I.12 Les Différents types de sandwich

1.3 Composites à matrice organique : les polymères

On désigne par monomère une molécule constituée principalement de carbone et d'hydrogène. Le terme macromolécule, quant à lui, est souvent employé pour décrire de grandes molécules, telles que celles résultant de la répétition d'unités structurales similaires. Ainsi, un polymère peut être défini comme une chaîne de répétition d'unités structurales identiques, ces dernières étant les monomères. Les polymères réticulés sont obtenus à partir de pré-polymères linéaires ou ramifiés de faible poids moléculaire (voir Figure I.13). Ils sont réticulés sous l'effet de la chaleur en présence d'un catalyseur. Cette réticulation confère à leur structure une dimension tridimensionnelle, limitant ainsi la mobilité des molécules et produisant des résines quasi infusibles et insolubles.

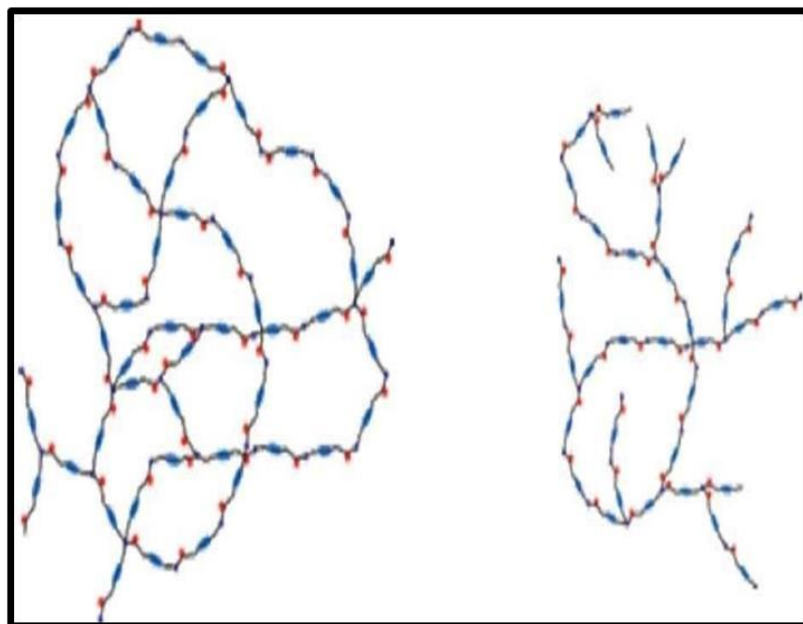


Figure I.13 Polymères à structure : (a) réticulée – (b) ramifiée

Le processus de polymérisation décrit une réaction chimique qui conduit à la solidification irréversible de la résine (valable uniquement pour les thermodurcissables), en fonction du temps et de la température. La taille de la macromolécule d'un polymère peut être caractérisée par sa masse moléculaire ou son degré de polymérisation (nombre de molécules de monomère formant la macromolécule). Les propriétés des polymères dépendent largement de ces caractéristiques, en particulier de la rigidité moléculaire, qui affecte la mobilité des segments de la molécule. Pour rendre les polymères utilisables comme matériaux industriels, des additifs sont souvent ajoutés et le semi-produit obtenu est appelé plastique. Dans le domaine des composites à matrice organique, deux grandes catégories de polymères sont utilisées : les thermoplastiques (TP) et les thermodurcissables (TD).

Même si la majorité des composites à matrice organique sont élaborés à partir de résines thermodurcissables, les propriétés mécaniques attrayantes des matières thermoplastiques suscitent actuellement un intérêt croissant dans la recherche et le développement industriel des composites.

Il est important de comprendre les différences fondamentales entre ces deux types de matrices pour appréhender le comportement mécanique spécifique de chaque type de composite. La principale distinction réside dans la façon dont le polymère se construit à partir du monomère. Les thermodurcissables ont une structure tridimensionnelle qui se solidifie de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée, tandis que les thermoplastiques ont une structure linéaire ou légèrement ramifiée qui se solidifie lors du refroidissement et dont la transformation est réversible en raison des liaisons physiques faibles de type Van Der Waals entre les macromolécules.

I.3.I. Principales différences entre les thermodurcissables et les thermoplastiques

Actuellement, les résines thermodurcissables dominent dans la production de matériaux composites. Néanmoins, avec l'amélioration des performances des résines thermoplastiques haut de gamme, leur adoption s'étend de plus en plus aux structures composites.

Mat rices	TD	TP
Etat de base	Liquide visqueux à polymériser	Solide prêt à l'emploi
Stockage	Réduit	Illimité
Mouillabilité des renforts	Aisée	Difficile
Moulage	Chauffage continu	Chauffage + refroidissement
Cycle	Long (polymérisation)	Court
Tenue au choc	Limitée	Assez bonne
Tenue thermique	Bonne	Réduite (sauf nouveau TP)
Chutes et déchets	Perdus ou utilisés en charges	Recyclables
Conditions de travail	Emanations de solvants	Propreté

Tableau I.6 Principales différences entre les thermodurcissables et les thermoplastiques

I.3.2 Mécanismes de déformation des polymères

Les polymères peuvent subir de grandes déformations plastiques et une réorientation à grande échelle de leurs chaînes, ce qui est révélé par une augmentation de température ou une diminution de la vitesse de chargement. Toutefois, les mécanismes de déformation des chaînes de polymères amorphes ou semi-cristallins sont spécifiques et traduisent la réorganisation structurale de ces macromolécules. L'essai de traction permet d'observer la déformation macroscopique du matériau, qui reflète les mécanismes de déformation microscopiques (voir figure I.14). Plusieurs paramètres peuvent être utilisés pour qualifier la réponse macroscopique d'un polymère, tels que sa rigidité, représentée par le module d'Young (E), sa résistance à la rupture et sa ductilité, représentée par l'allongement à la rupture (A_r). La nature ductile de la résine est donc importante pour caractériser les propriétés mécaniques des polymères.

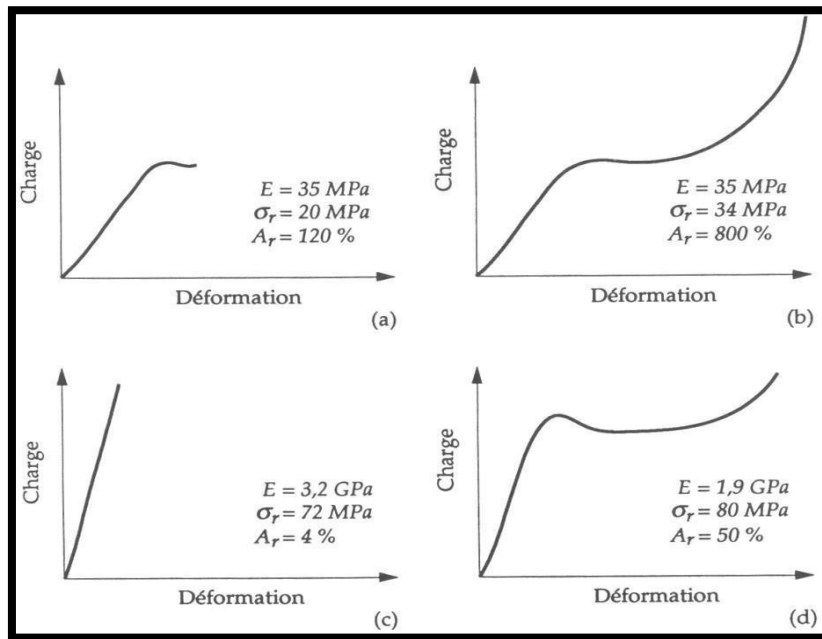


Figure I.14 Polymères à structure : (a) réticulée – (b) ramifiée courbes charge - déformation différents polymères [EHR00] : (a) souple et peu résistant – (b) souple et ductile – (c) rigide fragile – (d) rigide et ductile

En fonction de l'organisation structurale des polymères (amorphes ou semi-cristallins), les mécanismes microscopiques de déformation varient. Dans le cas des polymères amorphes, une sollicitation unidirectionnelle entraîne une réorganisation structurale qui correspond à un réarrangement spatial du réseau complexe d'enchevêtrements (cf. Figure. I.14a). On observe ainsi une réorientation des pelotes enchevêtrées et un alignement des chaînes de polymères (macromolécules) accompagnés par une déformation plastique par cisaillement (cf. Figure. I.14). La liaison covalente est représentée par un trait plein tandis que la liaison secondaire (pontages issus de la réticulation) est symbolisée par un trait en pointillé sur cette représentation schématique.

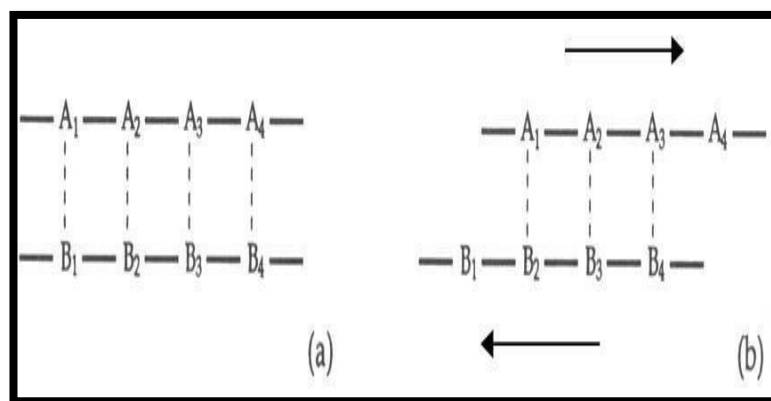


Figure I.15 Mécanisme de déformation plastique par cisaillement dans un polymère : (a) avant déformation – (b) après déformation

La réorganisation structurale des polymères est restreinte par le nombre d'enchevêtrements entre les chaînes qui empêchent l'étirement. Si les enchevêtrements sont peu nombreux, une structure para-cristalline peut être obtenue par déformation plastique. Un polyéthylène amorphe, avec peu d'enchevêtrements, peut ainsi subir un allongement de 14000 % par réarrangement et déformation plastique. La capacité à désenchevêtrer les chaînes est considérablement augmentées à haute température, avec des longueurs de chaîne courtes, une faible vitesse de déformation et une faible densité d'enchevêtrements.

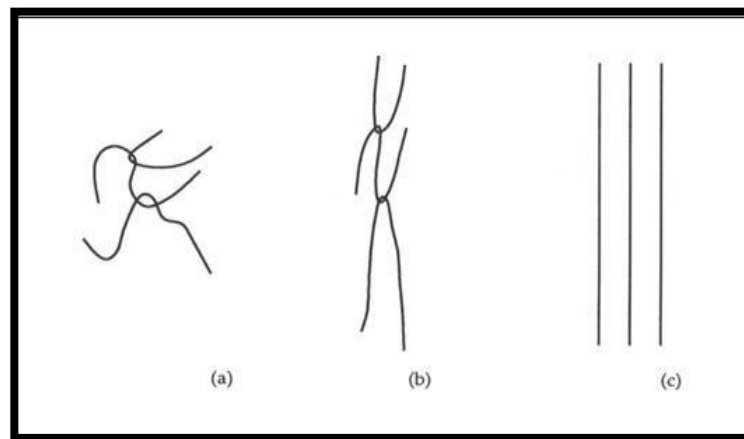


Figure I.16 Mécanisme de déformation des polymères amorphes lors d'une sollicitation unidirectionnelle : (a) état libre de contraintes – (b) déformation limitée par l'enchevêtrement – (c) structure para-cristalline parfaitement alignée.

Dans le cas des polymères semi-cristallins, leur structure est lamellaire et comprend une alternance de zones amorphes et cristallines Figure I.17a . Les zones cristallines sont formées de sphérolites, qui sont composées de lamelles cristallines (appelées cristallites) reliées par des chaînes amorphes. Ainsi, la réponse mécanique des thermoplastiques semi- cristallins soumis à des contraintes faibles est principalement liée à la réorientation et à l'alignement des chaînes amorphes selon la direction de la charge (Figure I.17b).

Lorsque la contrainte augmente, les lamelles cristallines s'alignent à leur tour avec l'axe de la sollicitation (Figure I.17c), puis les lamelles les plus grosses et les plus imparfaites se séparent en structures lamellaires individuelles (Figure I.17d). Ces mécanismes s'accompagnent enfin d'un étirement et d'une réorganisation de la distribution des microfibrilles (Figure. I.17e)

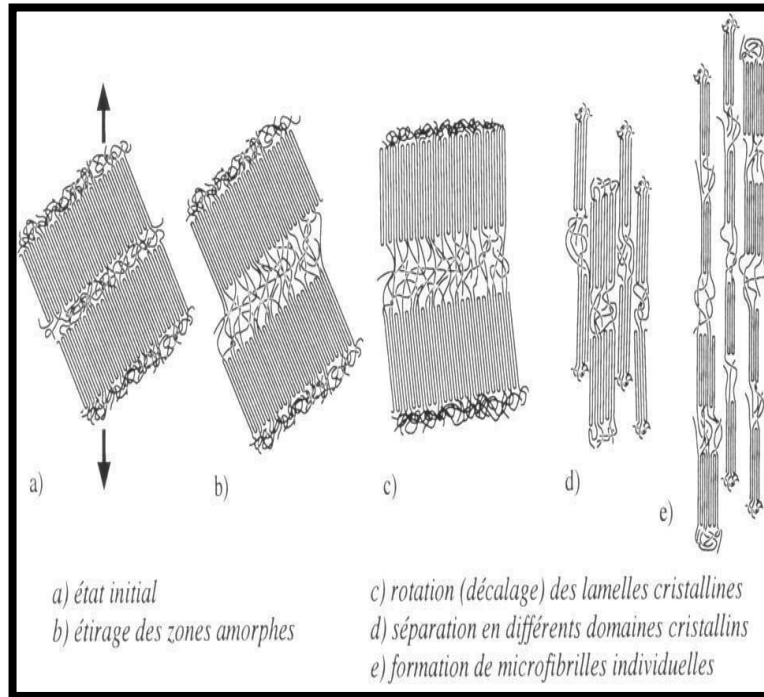


Figure I.17 Mécanisme de déformation des polymères semi-cristallins lors d'une sollicitation unidirectionnelle.

Au niveau des sphérolites, on peut distinguer les déformations homogènes des déformations inhomogènes. Une déformation homogène implique une déformation réversible du sphérolite, qui passe d'une forme sphérique approximative à un ellipsoïde. En revanche, lors d'une déformation inhomogène, les zones sphérolitiques perpendiculaires à la direction de sollicitation subissent une déformation irréversible. Les deux mécanismes de déformation peuvent se produire simultanément dans un même échantillon. Dans le cas des polymères semi-cristallins, l'exemple du polyéthylène structuré en couches lamellaires illustre les mécanismes de déformation successifs. La transformation en macrofibrilles individuelles au cours de l'étirage de la structure lamellaire est mise en évidence dans la figure suivante (cf. Figure I.18). Les lamelles de la zone A se réorientent totalement, alors que dans la zone B, les lamelles se séparent aux points faibles pour se positionner dans la direction principale de la contrainte de cisaillement.

La déformation locale dans les zones B et C est accompagnée d'une élévation importante de température, facilitant la réorganisation des chaînes. En raison de la mauvaise conductivité thermique des polymères et des gradients de température entre les zones, le réarrangement des chaînes est confiné dans les zones B et C, qui représentent la zone de striction. Dans la zone D, les blocs cristallins s'orientent de manière coopérative dans la direction de sollicitation pour finalement former une macrofibrille.

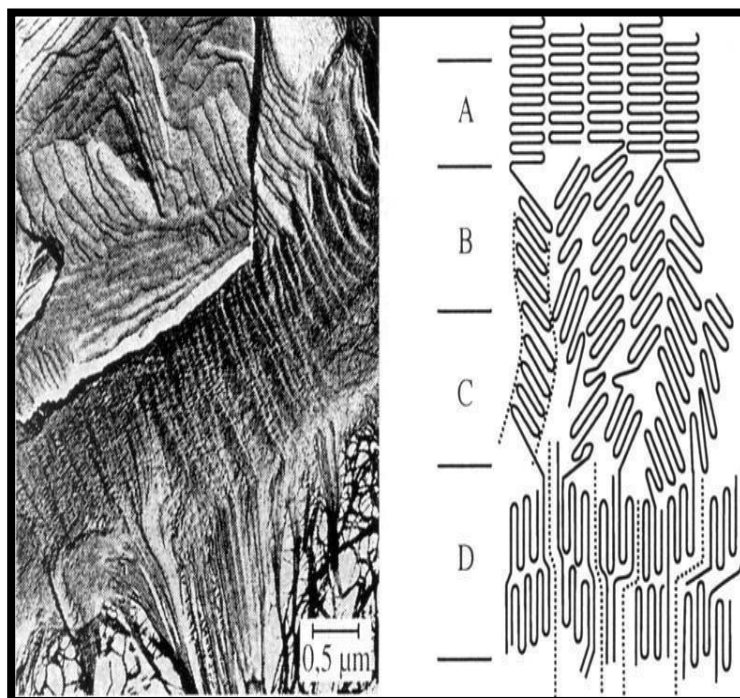


Figure I.18 Transformation structurale et représentation schématique des différentes zones lors de la déformation d'un polymère semi-cristallin

On peut décomposer la courbe de traction d'un polymère thermoplastique semi-cristallin en plusieurs parties qui correspondent aux mécanismes de déformation décrits précédemment (voir Figure I.19). Initialement, le matériau présente une réponse élastique linéaire. Ensuite, il entre dans le domaine viscoélastique linéaire et non-linéaire avant d'atteindre le seuil d'écoulement, où le phénomène de striction commence à apparaître. La longueur des zones de striction augmente proportionnellement à la charge. On observe ensuite un écoulement plastique stationnaire suivi d'une amélioration progressive de la résistance.

Cette augmentation est due à l'étirage à froid des chaînes dans la zone de striction. Par rapport aux processus de transformation à chaud (comme le thermoformage ou le moulage par injection), l'étirage à froid permet d'obtenir un taux d'étirage nettement plus élevé. En effet, l'étirage à chaud ne permet pas de maintenir un taux élevé d'orientation des chaînes observé à froid, en raison d'une relaxation trop importante de l'orientation des chaînes.

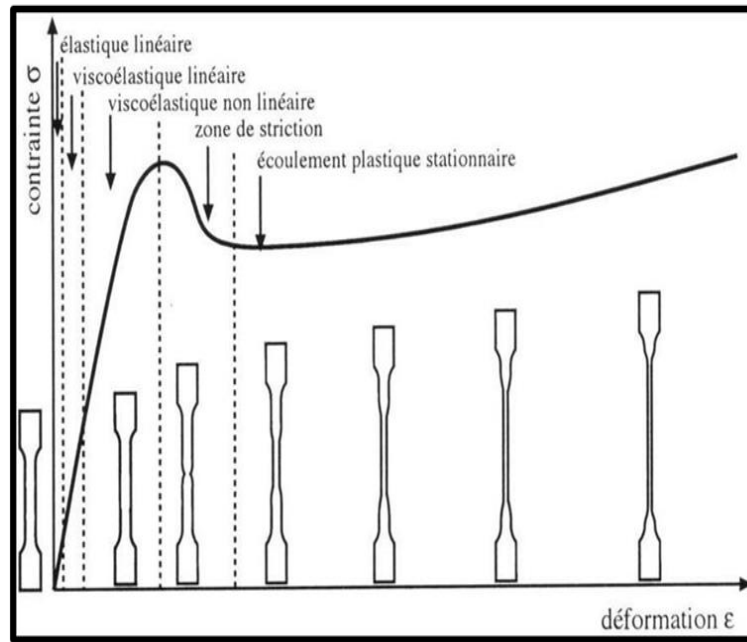


Figure I.19 Réponse caractéristique en traction d'un polymère thermoplastique semi- cristallin et évolution de la forme de l'éprouvette

1.4 Les Bio-composites

On peut définir les bio-composites comme des matériaux composites comprenant au moins une partie provenant de sources renouvelables, que ce soit la matrice ou le renfort.

La matrice peut être un polymère dérivé du pétrole non dégradables, comme le polyéthylène, le polypropylène et les époxy, ou un bio-polymère dérivé de sources naturelles, comme le PLA (polylactic acid).

Le renfort peut être synthétique, comme le verre et le carbone, ou naturel, comme les fibres végétales et animales. Les bio-composites peuvent être considérés comme étant plus respectueux de l'environnement, en particulier les bio-composites constitués de bio-polymères et de fibres naturelles, qui sont parfois appelés «composites verts ».

Les bio-composites sont biodégradables, renouvelables, peu coûteux et respectueux de l'environnement. Pour mieux comprendre les différentes catégories de composites, un schéma est présenté dans la figure I.20.

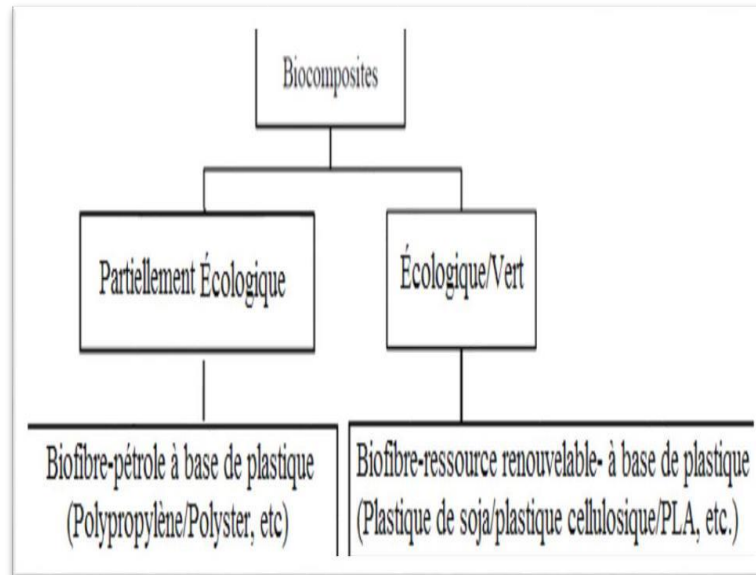


Figure I.20 Classification des bio-composites [19].

1.5 Les Bio-polymères

Les bio-polymères sont des molécules en forme de chaînes qui contiennent des unités répétitives de longueur variable, telles que des protéines composées d'acides aminés, des polysaccharides composés d'unités de sucre et des acides nucléiques composés de nucléotides. La composition des Bio-polymères détermine leurs propriétés physiques telles que la dureté, la résistance, la flexibilité et la durabilité. Les bio-polymères sont également connus pour leur biodégradabilité [20].

Le préfixe "bio" indique que ces matériaux proviennent de sources biologiques et sont biodégradables.

Les bio-polymères peuvent être dérivés de micro-organismes, de plantes, d'arbres ou de matériaux synthétiques issus de sources biologiques telles que les résines, les acides aminés, les protéines, les huiles végétales, les graisses et les sucres.

Les bio-polymères présentent une structure tridimensionnelle précise et spécifique, contrairement aux polymères synthétiques qui ont une structure aléatoire plus simple.

Les bio-polymères se distinguent des polymères dérivés de combustibles fossiles par leur durabilité, en particulier lorsque cela est combiné à leur biodégradabilité.

Afin de proposer des alternatives aux polymères dérivés de combustibles fossiles, des bio-polymères biodégradables ont été fabriqués à partir de ressources renouvelables telles que l'amidon, les sucres et les fibres naturelles. Les bio-polymères se dégradent lorsqu'ils sont exposés à des bactéries présentes dans le compost, le sol ou les sédiments marins, ce qui réduit considérablement les émissions de dioxyde de carbone par rapport à l'incinération classique.

Les consommateurs sont de plus en plus enclins à utiliser des ressources "vertes" ou

renouvelables pour les produits de consommation en raison de l'augmentation du coût des matières premières pétrolières, de l'aggravation de la situation environnementale mondiale due au réchauffement climatique et des problèmes liés à l'élimination des déchets créés par les polymères dérivés de combustibles fossiles.

Les bio-polymères sont considérés comme l'un des secteurs de matériaux à la croissance la plus rapide au cours des dernières années pour les raisons suivantes: l'insuffisance des ressources en combustibles fossiles, l'instabilité des prix des combustibles fossiles, la contribution des combustibles fossiles au changement climatique, son rôle occasionnel d'arme politique, sa relation avec le problème d'élimination des déchets créés par les polymères dérivés des combustibles fossiles, sa non-toxicité, sa sécurité pour la consommation orale et sa disponibilité abondante. La figure I.21 présente le cycle de vie des polymères biodégradables

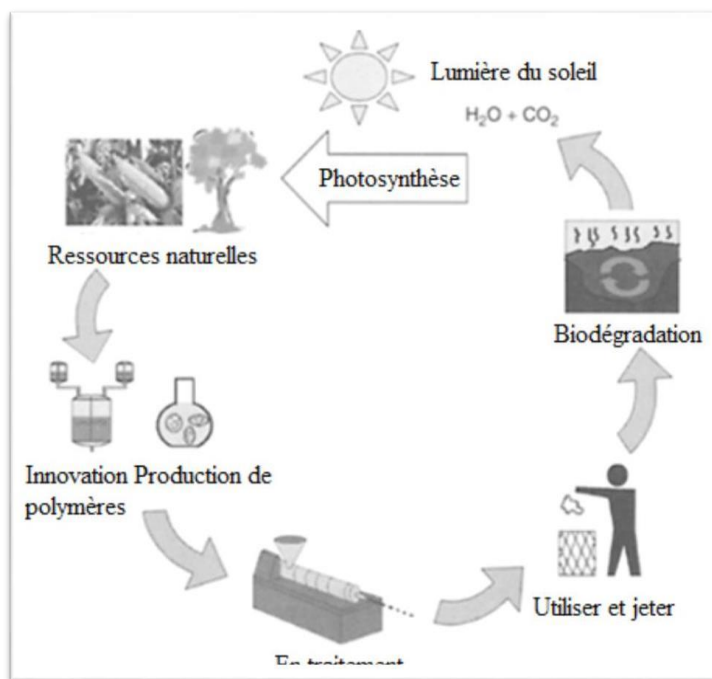


Figure I.21 Le cycle de vie des polymères biodégradables [19].

1.6 Méthode de préparation des matériaux composites

En raison de la plasticité, l'utilisation de fibres peut être placée dans plusieurs directions. Il existe de nombreuses techniques de préparation de matériaux composites, dont la plus largement utilisés est la méthode de moulage (Figure I.22). Les différentes étapes de sa préparation sont illustrées à la figure I.22 et figure I.23. Cette méthode dépend de la mise en place du mélange (matrice /

fibres) dans un moule, ensuite, nous appliquons une pression pour expulser l'air restant afin d'augmenter l'adhérence et l'adhérence des deux matériaux.

Lorsque le mélange est injecté (greffage) dans le moule, il devient une pâte qui subit une transformation chimique interne irréversible lui permettant de se solidifier durablement [30] ; Parmi les méthodes les plus importantes utilisées dans la préparation des matériaux, on dénombre les méthodes suivantes :

- Moulage par injection composé BMC
- Moulage sous pression de tapis de pré saturé SMC
- Injection de résine basse pression RTM
- Moulage par contact
- Méthode centrifuge
- Pultrusion
- En enroulant le filament (périphérique, spirale, fusiforme).

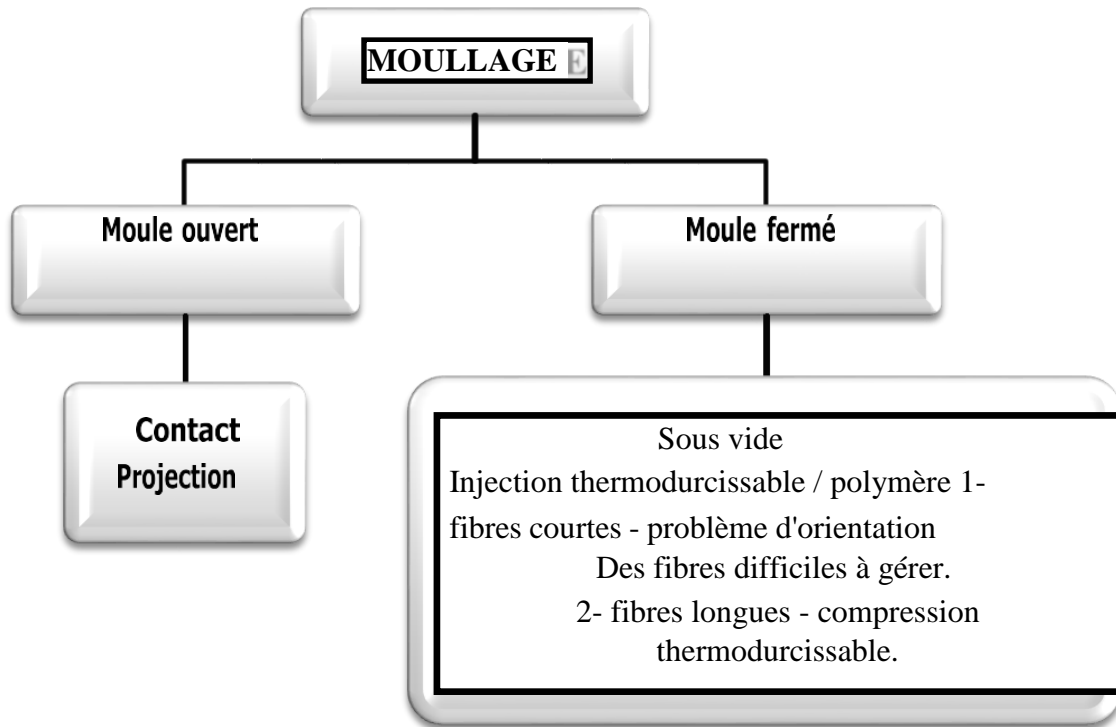


Figure I.22 : Le principe de la méthode de moulage [21].

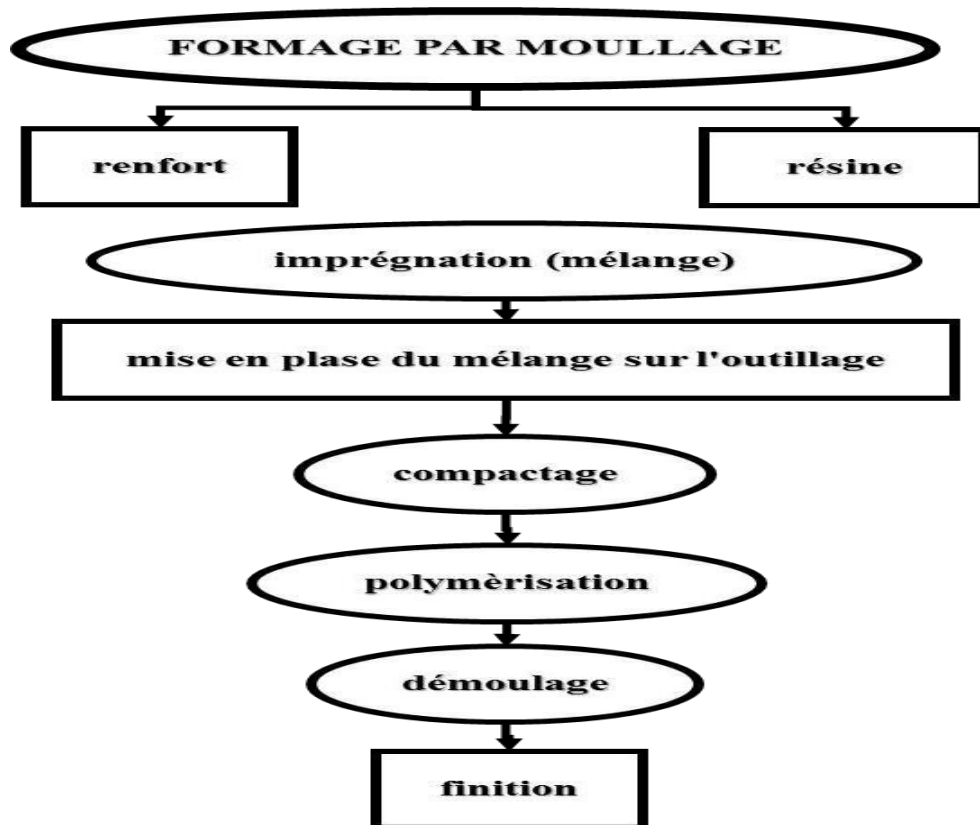


Figure 1.23 : Différentes étapes de la formation des composites par moulage fermé [22].

Conditions de préparation des composés : Afin de préparer les composés, les conditions suivantes doivent être respectées :

- Quantité de durcissement : car la proportion de fibres joue un rôle essentiel dans l'amélioration des propriétés mécaniques du composé de caoutchouc.
- Nature et direction du renfort : Nature et direction des fibres (courtes-longues-granuleuses).
- Nature des additifs.
- Méthode utilisée.

I.7 Conclusion

Les matériaux composites à matrice organique sont de plus en plus couramment utilisés pour leurs performances mécaniques et physiques supérieures. Ces composites sont composés de différents éléments tels que le renfort et la matrice qui travaillent ensemble pour produire des résultats optimaux. Les polymères, qui constituent une partie importante de la matrice organique, ont été examinés en détail et leur choix peut influencer les propriétés globales du matériau. Ainsi, il est crucial de comprendre les propriétés et les mécanismes de déformation des polymères pour concevoir et fabriquer des composites adaptés à des applications spécifiques. Le développement de nouveaux polymères et de techniques de fabrication avancées continuera de repousser les limites de ce domaine passionnant et innovant de l'ingénierie des matériaux.

Chapitre II Comportement d'un matériau composite à matrice thermodurcissable

II.1. Introduction

La connaissance des caractéristiques mécaniques d'un matériau composite et de sa structure permet de comprendre, voire de prédire son comportement en service. Afin de caractériser son comportement dans des conditions bien précises, nous avons recours à un certain nombre d'essais. Car toute conception d'une nouvelle structure nécessite une connaissance du comportement mécanique des matériaux utilisés ainsi que de leurs propriétés mécaniques (limite d'élasticité, charge de rupture, limite d'endurance en fatigue, etc.). Parmi les moyens utilisés pour avoir accès à ces données, la caractérisation passe donc par des essais sur chaque type de composite utilisé.

- Essais mécaniques sur le composite

Les propriétés du composite doivent satisfaire le cahier des charges (calculs de résistance et de durabilité). Le contrôle du taux de renfort et de la température de transition permet de situer la qualité du produit. Les essais non-destructifs permettent la mise en évidence des défauts de structure qui initient l'endommagement ainsi que l'évolution du processus de rupture [23].

- Essais statiques

-Essai de traction et de compression (traction longitudinale, transversale, hors axes, compression longitudinale...);

-Essai de flexion (trois points, quatre points, par flambement...);

-Essai de dureté;

-Essais dynamiques;

-Essai de compression dynamique [23];

- Essai au choc;

- Essai de fatigue.

II.2 Définition D'un matériau composite à matrice thermdurcissable

Un matériau composite à matrice thermdurcissable est un type de matériau composite dans lequel la matrice est fabriquée à partir d'un polymère thermdurcissable, tel que l'époxy, le polyester ou la phénolique. Les fibres de renforcement, telles que les fibres de verre, de carbone ou d'aramide, sont incorporées dans la matrice thermdurcissable liquide et durcie. Par réaction chimique pour former un matériau solide.

Les composites à matrice thermdurcissable ont des propriétés mécaniques élevées, une résistance à la corrosion, une résistance chimique, une résistance à l'impact et une stabilité dimensionnelle, ce qui les rend adaptés à une large gamme d'applications industrielles.

Cependant, ils sont plus difficiles à recycler que les composites à matrice thermoplastique. Ces propriétés et avantages en font un choix populaire pour des applications dans l'industrie aérospatiale, l'industrie des sports et loisirs, l'industrie automobile et la construction navale [24].

Un matériau composite à matrice thermdurcissable est un type de matériau composite dans lequel la matrice est constituée d'un polymère thermdurcissable tel que l'époxy, la résine phénolique ou la résine polyester. Les matrices thermdurcissables sont des polymères qui subissent une réaction chimique irréversible lorsqu'ils sont chauffés, formant ainsi une structure tridimensionnelle stable.

Les composites à matrice thermdurcissable sont largement utilisés dans l'industrie aérospatiale, l'automobile, l'électronique et d'autres applications où une résistance mécanique élevée et une résistance aux températures élevées sont nécessaires [25].

II. 3 Loi de Hooke généralisée.

Comportement élastique des matériaux composites à matrice thermodurcissable.

Pour un matériau donné, les lois de comportement consistent notamment à déterminer la relation entre contrainte et déformation lorsque le matériau est soumis à des contraintes externes. Dans un continuum élastique, l'état de contrainte en un point d'un système de coordonnées orthogonales donné (x, y, z) est complètement défini par le tenseur de contrainte noté σ_{ij} . Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibre et matrice sont très importantes pour la création de structures composites. En effet, il ne doit y avoir aucun glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes propriétés mécaniques élastiques.

La relation d'élasticité linéaire peut s'écrire sous la forme suivante [26] :

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (\text{II.1})$$

Ou sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

La matrice de rigidité C est symétrique. Le comportement linéaire d'un matériau est donc décrit dans le cas général à l'aide de 21 coefficients indépendants. La matrice de flexibilité ou de souplesse S_{ij} , peut être écrite sous la forme inverse, suivante :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

Avec

$$S = C^{-1} \quad (II.4)$$

Un matériau dépendant de 21 constantes indépendantes est dit un matériau anisotropie. C'est un matériau ne possédant aucune propriété de symétrie.

II.3.1 Matériaux monocliniques.

Les "matériaux monocliniques" se réfèrent à des substances présentant une structure cristalline de type monoclinique. En cristallographie, la monoclinique est l'un des systèmes cristallins, caractérisé par des axes de longueurs inégales et des angles non droits. Les matériaux monocliniques peuvent manifester des propriétés spécifiques en raison de leur arrangement atomique particulier dans cette structure cristalline.

Si le matériau a un plan de symétrie, monoclinique, quelques constantes sont nulles et le comportement peut être décrit avec 13 constantes indépendantes [27] :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

II.3.2 Matériaux orthotropes.

Les "matériaux orthotropes" sont des substances dont les propriétés physiques et mécaniques varient selon les directions orthogonales (perpendiculaires) les unes par rapport aux autres.

Contrairement aux matériaux isotropes qui présentent des propriétés uniformes dans toutes les directions, les matériaux orthotropes affichent une anisotropie, c'est-à-dire des caractéristiques différentes selon les axes orthogonaux.

Ces propriétés peuvent inclure la résistance, la rigidité, la conductivité thermique et d'autres aspects, dépendant de la direction dans laquelle elles sont évaluées.

Les matériaux orthotropes sont couramment utilisés dans l'ingénierie pour exploiter des propriétés spécifiques dans des directions déterminées.

Un milieu est dit orthotrope pour une propriété donnée si cette propriété est invariante par changement de direction obtenue par symétrie relative à deux plans orthogonaux.

On remarque alors que la symétrie par rapport au troisième plan orthogonal est automatiquement acquise. Ce mode de comportement est relativement bien réalisé pour les composites unidirectionnels [28].

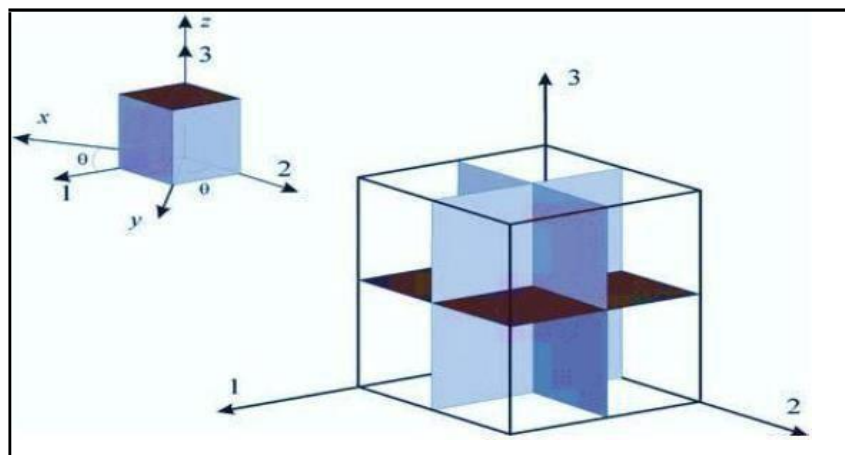


Figure II.1 : Représentation des trois plans de symétrie d'un matériau orthotrope.

La symétrie de la matrice de souplesse [S] impose les relations suivantes :

- $\frac{V_{21}}{E_2} = \frac{V_{12}}{E_1}$
- $\frac{V_{31}}{E_3} = \frac{V_{13}}{E_1}$
- $\frac{V_{33}}{E_2} = \frac{V_{22}}{E_3}$

II.3.3 Matériaux isotropes.

Les "matériaux isotropes" se réfèrent à des substances dont les propriétés physiques et mécaniques sont uniformes dans toutes les directions. En d'autres termes, ces matériaux présentent une symétrie sous toutes les orientations, ce qui signifie que leurs caractéristiques, telles que la conductivité thermique, la conductivité électrique ou la résistance mécanique, sont les mêmes indépendamment de la direction dans laquelle elles sont mesurées.

L'isotropie est souvent recherchée dans certaines applications pour assurer une réponse homogène aux sollicitations ou aux conditions environnementales.

Dans ce cas, toutes les directions et en tout point du matériau ont les mêmes propriétés mécaniques.

II.3.4 Matériaux isotropes transverses.

Les "matériaux isotropes transverses" se réfèrent à des substances présentant une isotropie dans une direction perpendiculaire, également appelée direction transverse.

Ces matériaux conservent des propriétés physiques uniformes lorsqu'elles sont mesurées dans des plans perpendiculaires à une direction spécifique.

Ainsi, bien que l'anisotropie puisse être présente le long de cette direction particulière, les propriétés demeurent isotropes dans les plans perpendiculaires.

Cette caractéristique peut être pertinente dans des applications où des propriétés homogènes sont nécessaires dans certaines directions spécifiques.

Un matériau isotrope transverse est un matériau orthotrope qui comporte un axe ou un plan d'isotropie. Les propriétés suivant l'axe 2 et 3 sont identiques, donc [31] :

- $C_{22} = C_{33}$
- $C_{12} = C_{13}$
- $C_{55} = C_{66}$
- $C_{44} = \frac{C_{22} - C_{33}}{2}$

Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 5. La loi de comportement s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{C_{22} - C_{33}}{2} & 0 & 0 \\ & sym & & & C_{66} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^1 \\ \varepsilon^2 \\ \varepsilon^3 \\ \varepsilon^4 \\ \varepsilon^5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

II.3.5 Matériaux quasi isotropes transverses.

Les "matériaux quasi-isotropes transverses" se réfèrent à des substances qui démontrent une isotropie approximative dans une direction transversale spécifique.

Ces matériaux présentent des propriétés physiques relativement uniformes lorsqu'elles sont mesurées dans des plans perpendiculaires à une direction particulière, bien que cette isotropie puisse être approximative ou partielle.

L'utilisation du terme "quasi-isotrope" indique que, bien que des variations puissent exister dans certaines directions, les propriétés restent relativement équivalentes ou homogènes dans ces plans transversaux spécifiques.

Cette caractéristique est souvent recherchée pour atteindre un équilibre entre l'isotropie et l'anisotropie dans des applications spécifiques [31].

II.3.6 Matériaux quasi isotropes.

Les "matériaux quasi-isotropes" sont des substances dont les propriétés physiques sont approximativement uniformes dans toutes les directions, bien que des variations limitées puissent exister. Le terme "quasi-isotrope" suggère que, bien que l'anisotropie puisse être présente, elle est minimisée de manière à ce que les propriétés du matériau soient considérées comme isotropes dans une large mesure.

Cette caractéristique est souvent recherchée pour obtenir une réponse mécanique ou thermique équilibrée dans différentes directions, tout en acceptant des variations limitées [32].

Le nombre de coefficients indépendants se réduit à 3 coefficients, la loi de comportement s'écrit [32] :

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ C & 0 & 0 & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ \text{sym} & & & & & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

II.4 Caractéristiques mécaniques du mélange renfort-matrice [25] :

Les lois de mélange permettent de déterminer les caractéristiques d'un matériau composites en fonction de ces constituants (fibre et matrice) et leur teneur volumique. Les caractéristiques mécaniques de ces constituants sont :

V_f, V_m : Teneur volumique des constituants (f : fibre, m : matrice).

E_f, E_m : Modules de Young.

G_f, G_m : Module de coulomb (glissement).

ν_f, ν_m : Coefficients de Poisson.

✓ Teneur en volume et en masse du renfort et de la matrice

$$V_f = \frac{\text{Volume de renfort}}{\text{Volume totale}} \quad \text{et} \quad V_m = \frac{\text{Volume de la matrice}}{\text{Volume totale}}, \quad (\text{II.8})$$

$$M_f = \frac{\text{masse de renfort}}{\text{masse totale}} \quad \text{et} \quad M_m = \frac{\text{masse de la matrice}}{\text{masse totale}}, \quad (\text{II.9})$$

Avec

$$M_f = 1 - M_m \quad \text{et} \quad M_f = \frac{V_f \rho_f}{V_f \rho_f + V_m \rho_m}, \quad (\text{II.10})$$

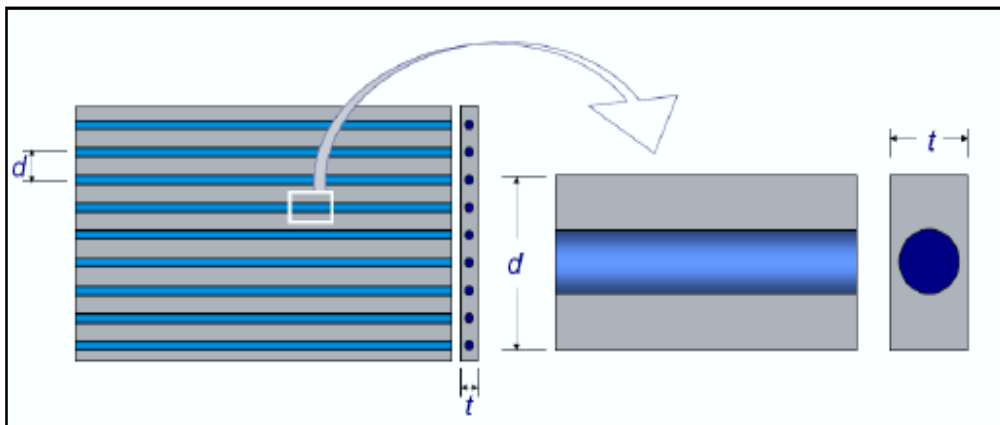


Figure II.2 : Structure élémentaire d'un matériau composite unidirectionnel [33].

✓ **Module d'élasticité dans le sens des fibres**

$$E_l = E_m V_m + E_f V_f \quad (\text{II.11})$$

✓ **Module d'élasticité dans le sens transversal des fibres**

$$E_t = E_m \left[\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m}{E_{ft}} V_f} \right] \quad (\text{II.12})$$

E_{ft} : Module de Young dans le sens transversal des fibres (fibres anisotropes), mais dans la majorité des cas en utilisant $E_{ft} \approx E_f$ donc :

$$E_t = \frac{E_m E_f}{E_f V_m + E_m V_f} \quad (\text{II.13})$$

✓ **Coefficient de Poisson**

Il caractérise la contraction dans le sens transverse t du pli lorsqu'on le sollicite en traction suivant le sens l .

$$\nu_{lt} = \nu_m V_m + \nu_f V_f \quad (\text{II.14})$$

II.5 Essai de traction

Il s'agit d'un des essais les plus pratiqués et simple à mettre en œuvre, permet de déterminer les caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité σ_e , charge de rupture σ_r , le module de Young E , le coefficient de poisson μ ainsi que la contrainte maximale de traction $\sigma_{tr \max}$.

L'essai de traction est effectué en utilisant des éprouvettes normalisées ; elles sont soumises à une extension progressive dans le sens de :

- longueur des fibres (traction longitudinale) ;
- perpendiculaire aux fibres (traction transversale) ;
- l'angle de 45° par rapport à la direction des fibres (traction hors axes).

II.5.a Traction longitudinale

La charge F_1 est exercée suivant la direction des fibres (composite unidirectionnel) ou suivant la direction de chaîne (composite tissu) sur la section droite S_1 du matériau, Figure II.3 [38].

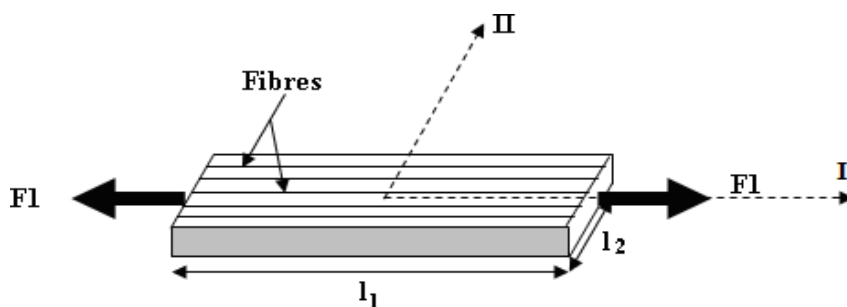


Figure II.3 : Traction longitudinale.

La contrainte normale σ_{11} est donnée par :

$$\sigma_{11} = \frac{F_1}{S_1} \quad (\text{II.15})$$

Les déformations longitudinales et transversales sont données respectivement par :

$$\varepsilon_{11} = \frac{\Delta l_1}{l_1} \quad (\text{II.16})$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\Delta l_2}{l_2} \quad (\text{II.17})$$

Le module longitudinal E_L et le coefficient de poisson μ_{LT} sont ensuite calculés à partir des expressions suivantes :

$$E_L = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} \quad (\text{II.18})$$

$$\mu_{LT} = - \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (\text{II.19})$$

II.5.b Traction transversale

La charge F_2 est exercée suivant la direction transverse aux fibres ou suivant le sens de la trame (Figure II.4)[39].

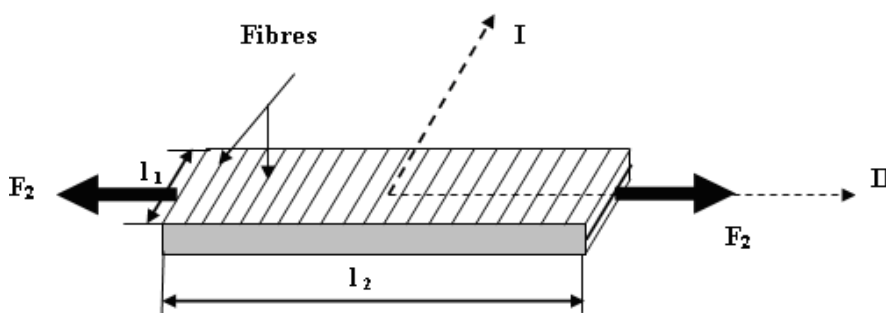


Figure II.4 : Traction transversale.

La contrainte normale σ_{22} est donnée par :

$$\sigma_{22} = \frac{F_2}{S_2} \quad (\text{II.20})$$

S_2 : l'aire de la section droite sur laquelle est exercée la charge F_2 .

Le module de Young transversal E_T et le coefficient de poisson μ_{TL} sont calculés respectivement par les relations (II.7) et (II.8).

$$E_T = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon_{22}} \quad (\text{II.21})$$

$$\mu_{TL} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}} \quad (\text{II.22})$$

II.5.c Traction hors axes (essai de traction à 45°)

L'essai usuellement utilisé pour mesurer le module de cisaillement longitudinal G_{LT} , est un essai de traction effectué à 45° de la direction des fibres.

La charge F est exercée suivant la direction X sur la section S (Figure II.5) [49].

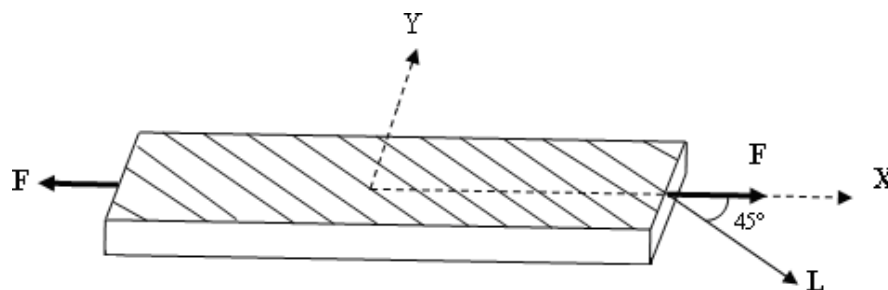


Figure II.5: Traction hors axes.

Lors d'un essai de traction hors axes sur composites unidirectionnel, le matériau subit un état de contraintes planes (contraintes longitudinales, transversales et de cisaillement).

La contrainte normale σ_{xx} est donnée par :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S} \quad (\text{II.23})$$

Le module de Young dans la direction X s'exprime par :

$$E_{45} = E_x = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon} \quad (\text{II.24})$$

Ce module s'exprime par :

Le module de cisaillement longitudinal G_{LT} est donné par :

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_L} + 2 \frac{\mu_{LT}}{E_L} \quad (\text{II.25})$$

La Figure II.6 représente des éprouvettes découpées avec des angles différents par rapport à la direction du renfort pour l'essai hors axe.

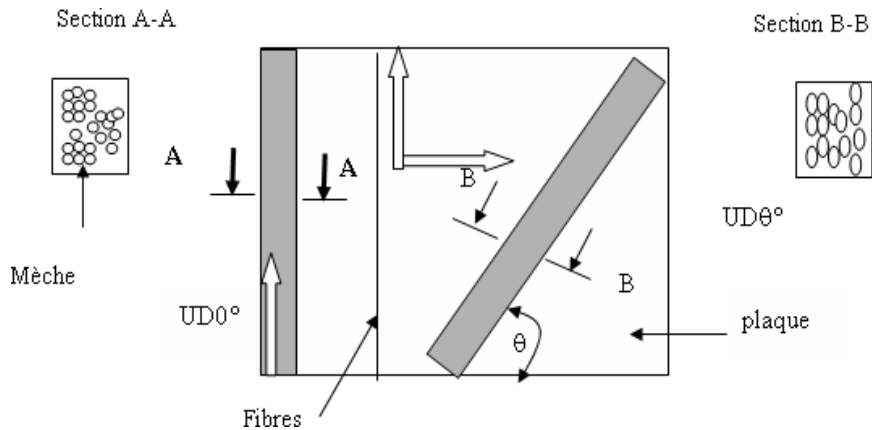


Figure II.6 : Obtention des éprouvettes unidirectionnelle et hors axe dans la plaque.

II.6 Essais de compression

L'essai consiste à appliquer à vitesse constante un effort de compression sur un barreau parallélépipédique disposé verticalement.

Il détermine la contrainte à la rupture en compression [49].

Mais pour cet essai la résistance du matériau composite unidirectionnel dépend de multiples facteurs tels que la fibre, la matrice, la résistance inter faciale et le taux de vide. Cet essai détermine la contrainte à la rupture en compression qui est définie par la formule (II.7).

$$\sigma = \frac{F_r}{lh} \quad (\text{II.26})$$

Avec : F_r charge à la rupture

L : Longueur de l'éprouvette

H : épaisseur de l'éprouvette

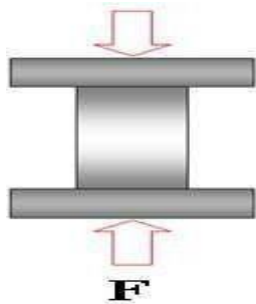


Figure II.7 : Essai de compression.

II.7 Essais de flexion

Les essais de flexion monotone sont réalisés suivant les recommandations de la T 57- 105, T 57-302, ASTM D 790, JIS K 7074 ou future norme EN ISO 14125. Ces essais sont largement utilisés en raison de leur simplicité. Cependant, la flexion n'engendre pas un état de contrainte simple (ou pure) au sein des matériaux testés. En fonction de l'élanement de l'éprouvette (rapport de l'épaisseur sur la distance entre appuis) qui gouverne le rapport contraintes normales (traction/compression) / contraintes de cisaillement et en fonction des résistances en traction, compression et cisaillement du matériau, l'un ou l'autre des trois modes de rupture peut être obtenu [50]. Nous proposons dans notre étude trois types d'essai de flexion :

- Essai de flexion trois points ;
- Essai de flexion quatre points ;
- Essai de flexion par flambement.

II.7.a Essais de flexion trois points

Les essais de flexion trois points (Figure II.13) sont réalisés suivant les recommandations de la norme française NFT57-104 et 105. Ils offrent les avantages d'utiliser des éprouvettes de conception simple avec des barreaux de section rectangulaire [38]

Le principe de cet essai consiste à déformer une éprouvette parallélépipédique reposant sur deux appuis, par l'intermédiaire d'une panne située à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante, dans le but de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux telles que le module de Young et la résistance en flexion, la flèche maximale...etc. ; on enregistre la courbe contrainte-déformation.

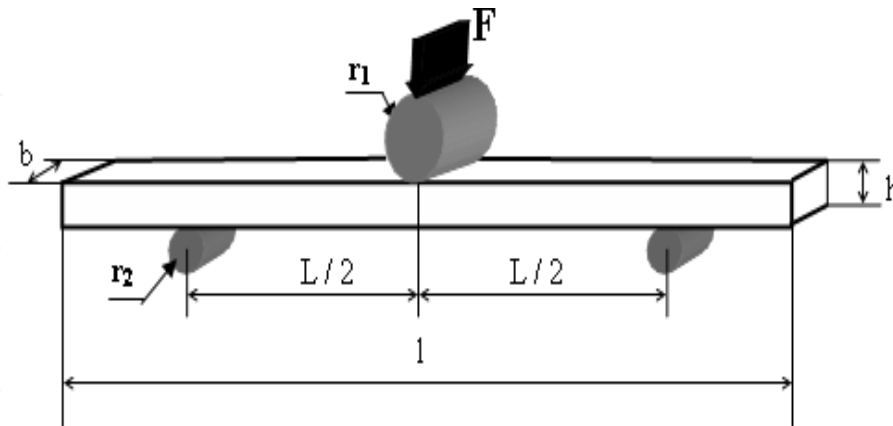


Figure II.8 : Dispositif d'essai et dimensions de flexion trois points

Avec :

- F : charge appliquée ;
- r_1 : rayon de cylindre de la panne ($= 5mm$) ;
- r_2 : rayon des cylindres d'appuis ($= 2.5mm$) ;
- L : longueur entre appuis ;
- l : longueur totale de l'éprouvette ;
- h : hauteur de la poutre ;
- b : largeur de la poutre.

L'essai de flexion trois points sollicite de façon symétrique, une face de l'éprouvette soumise à une contrainte de traction et l'autre face à une contrainte de compression. Il existe aussi une troisième contrainte de cisaillement, sa valeur maximale est située au niveau de la ligne neutre, et qu'en fonction de la géométrie de l'éprouvette d'essai, il y a compétition entre une rupture en flexion et une rupture en cisaillement, et la courbe de contrainte – déformation est donnée par la Figure II.9.

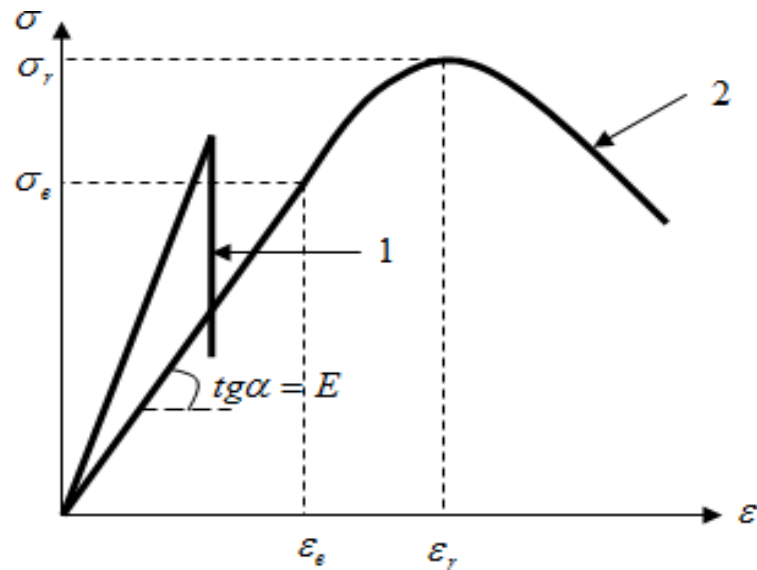


Figure II.9: Courbe de contrainte-déformation : 1) matériau fragile ; 2) matériau ductile.

Les dimensions de l'éprouvette sont telles que $l=16h$; b est fonction de h comme indique dans le tableau II.1 (dimensions en mm) [40] :

Epaisseur h	Largeur b
$1 < h \leq 10$	$15^{\pm 0.5}$
$10 < h \leq 20$	$30^{\pm 0.5}$
$20 < h \leq 35$	$50^{\pm 0.5}$
$35 < h \leq 50$	$80^{\pm 0.5}$

Tableau II.1: Dimensions des éprouvettes pour les essais de flexion.

Les informations extraites de cet essai sont force et flèche à la rupture.

Certaines conditions de sollicitation doivent être respectées. En effet lors de la sollicitation de flexion, le champ de contrainte n'est pas homogène, et l'effort appliqué engendre non seulement des contraintes normales de traction compression (II.9) (Figure II.10.a) mais également des contraintes de cisaillement (II.10), maximale sur la ligne neutre ($y=0$) (Figure II.10.b).

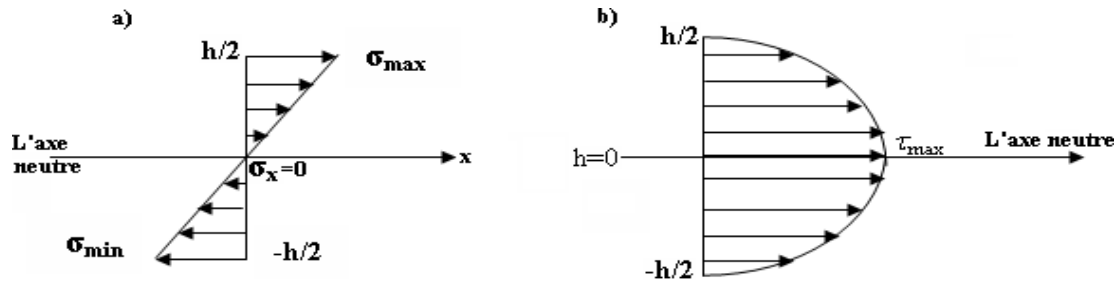


Figure II.10: Représentation des contraintes internes d'une éprouvette sollicitée en flexion trois points.

L'influence de ces contraintes de cisaillement n'est pas négligeable car lors d'un essai de flexion trois points, la flèche total δ_T imposée à l'éprouvette est la résultante des contributions du fléchissement δ_f et du cisaillement δ_c .

Lors des essais de flexion, il est possible de privilégier un mode de rupture par rapport à l'autre en jouant sur la distance entre appuis. Par exemple, pour des composites à fibres de verre, on aura :

- Pour $L/h \geq 16$, rupture en traction/compression ;
- Pour $L/h \leq 5$, rupture en cisaillement inter-laminaire.

➤ Délaminage en flexion trois points

Les composites obtenus par empilement des couches sont sujet au délaminage, se traduisant par une décohésion des couches. Pour obtenir un cisaillement dans l'essai de flexion trois points, le rapport L/h doit être inférieur à 5. Ce type d'essai ne permet pas de calculer le mode de cisaillement interlaminaire : si la distance entre appuis est très faible, il est très difficile, en pratique, de mesurer la flèche de l'éprouvette.

II.7.b Essais de flexion quatre points

L'essai de flexion à quatre points consiste à exercer entre les appuis deux points d'applications de la charge, distants de L , (Figure II.11) où l'effort tranchant est nul dans la zone des contraintes maximales.

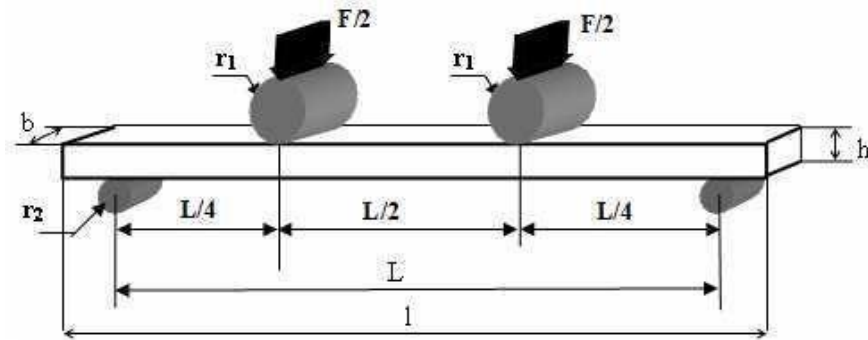


Figure II.11 : Essai de flexion à quatre points.

La contrainte maximale et le module de flexion s'exprime par :

La contrainte de flexion :

$$\sigma_{fl} = \frac{3FL}{4bh^2} \quad (II.27)$$

Le module de flexion :

$$E_{fl} = \frac{11L^3 F}{64bh^3 \delta} \quad (II.28)$$

Détermination des efforts tranchants :

$$T = -\frac{F}{2} \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{4}$$

$$T = 0 \quad \frac{L}{4} \leq x \leq \frac{L}{2}$$

Détermination du moment :

$$M = -\frac{Fx}{2} \quad 0 \leq x \leq \frac{L}{4}$$

$$M = -\frac{FL}{8} \quad \frac{L}{4} \leq x \leq \frac{L}{2}$$

Ainsi que la répartition des efforts sur la longueur d'éprouvette est schématisée par la Figure II.12.

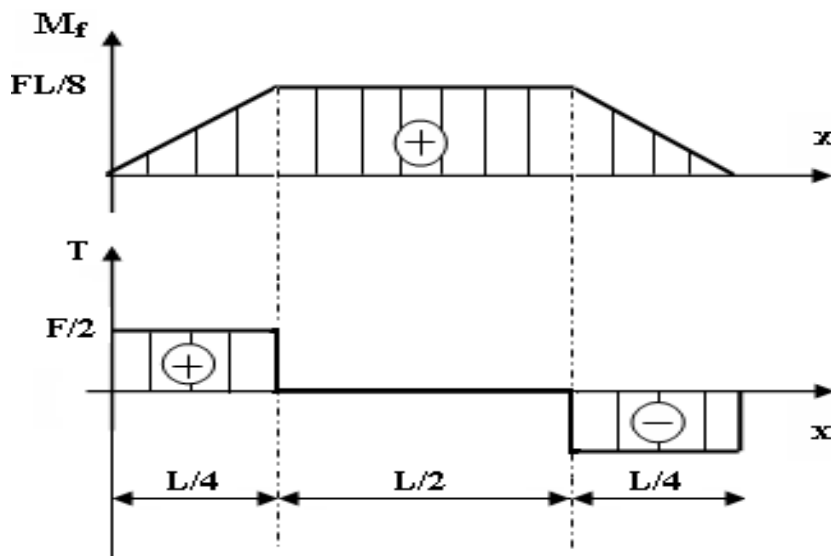


Figure II.12: Répartition des efforts sur la longueur d'une éprouvette sollicitée à une flexion quatre points.

II.7.c Essais de flexion par flambement

Lorsqu'on exerce un effort de compression sur une poutre bi-articulée à fort élancement, la ruine de la structure ne se produit pas par rupture en compression comme le prédit la résistance des matériaux, mais par un phénomène de courbure de grande amplitude appelée flambement (Figure II.19). Dans cette configuration, la force appliquée crée, au centre de la poutre, un moment fléchissant d'autant plus important que la courbure est grande. On est en présence d'un phénomène d'instabilité. Le seuil est caractérisé par la charge critique d'Euler.

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{II.29})$$

E : module de Young dans la direction

X I : moment d'inertie par rapport à l'axe Z

L : longueur initiale de la poutre.

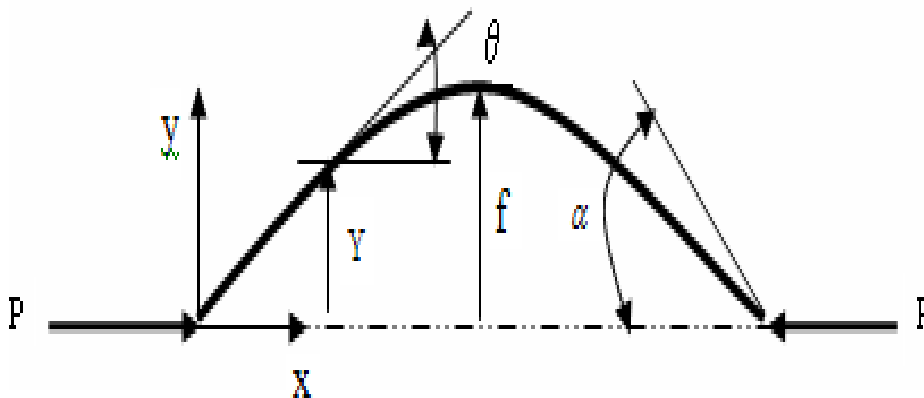


Figure II.13: Configuration de flambement.

L'essai de flambement permet en effet de contourner les problèmes de concentrations de contraintes de contact générées par les appuis en flexion trois ou quatre points.

La validation de cette méthode demande la mise au point d'un banc d'essai spécifique qui nous permettra de mener différents essais sur des matériaux composites à matrices organiques.

II.8 Essais de cisaillement

Les essais de cisaillement utilisés pour l'étude des matériaux composites permettent de connaître le comportement au cisaillement (contrainte et module de cisaillement) soit selon une sollicitation dans le plan des couches (cisaillement inter laminaire), soit selon une sollicitation perpendiculaire aux couches [50].

Ces essais sont très souvent difficiles à mettre en œuvre, bien qu'ils soient très importants pour l'étude d'un matériau composite. Plusieurs méthodes d'essais existent et chacune présente quelques inconvénients

II.9 Essais de torsion tube

Une éprouvette de forme tubulaire et de longueur suffisante se fixe sur un embout métallique avec un renforcement continu de plastique armé (Figure II.14). La mesure de la déformation se fait à l'aide des jauges de déformation dans la partie centrale, en deux points opposés (les jauges sont placées à 45°)[51].

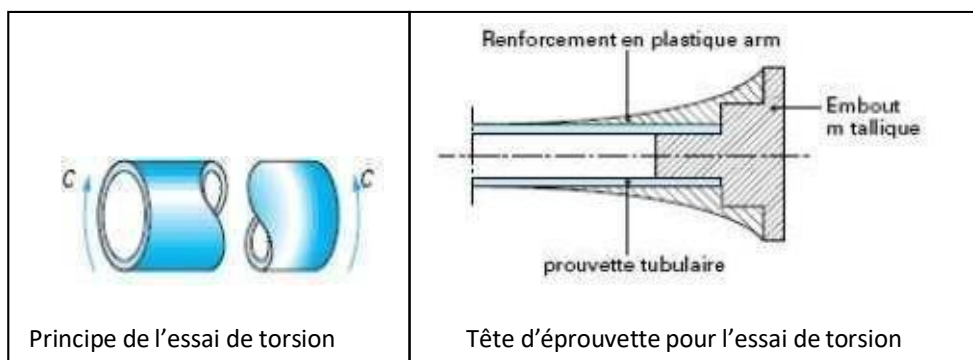


Figure II.14 : Essai de torsion d'un tube.

II.10 Essais de dureté

La dureté peut être définie comme une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée. Les méthodes de mesure de la dureté (essais Brinell, Vickers et Rockwell ... etc.) sont basées sur la pénétration d'un indenteur à la surface du matériau. Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension de l'empreinte faite par l'indenteur soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées.

❖ Dureté Brinell (symbole HB) :

Elle est obtenue par calcul. Après essai, on mesure l'empreinte laissée par une bille polie (diamètre : 1-2,5-5-10 mm) et la valeur de la charge F appliquée pour obtenir cette empreinte (essai usuel : F = 3 000 daN, d = 10 mm, pendant 15 à 60 secondes).

❖ **Dureté Vickers (symbole HV) :**

Elle est obtenue par calcul ; le principe est identique au précédent mais avec une pyramide droite en diamant à base carrée dont l'angle au sommet est de 136°.

Utilisation : tous métaux.

Variante : essai Knoop (micro-dureté, empreinte en forme de losange, matériaux durs pour petites pièces et fines sections).

❖ **Dureté Rockwell (symbole HR)**

C'est l'essai de dureté le plus connu mondialement. Dans ce cas, la dureté, contrairement à Brinell et Vickers, est obtenue par lecture directe d'une longueur d'enfoncement d'un pénétrateur, bille acier ou cône diamant.

Une pré charge (F_0) permet de faire une empreinte initiale et, par-là, d'éliminer les incertitudes propres aux défauts de la surface.

Le tableau II.2 donne l'échelle de mesure pour l'essai de dureté :

Échelle	Utilisation
HR_C	Pour ferreux
HR_D et HR_A avec cônes	Pour matériaux durs et très durs : carbures, Aciers trempés...
HR_B	Non ferreux et métaux en feuilles
HR_E, HR_F, HR_G	Pour métaux doux
HR_M et HR_R avec billes	Pour matières plastiques.

Tableau II.2: Echelle de mesure

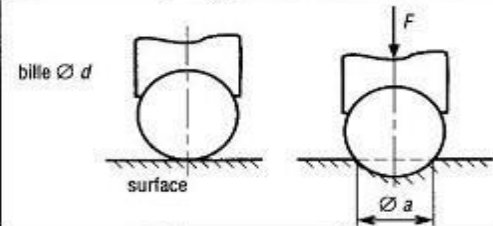
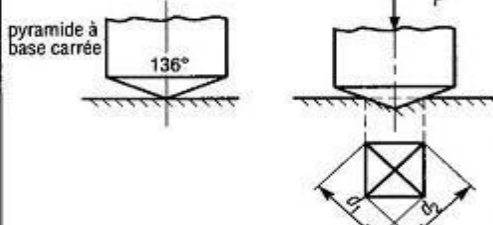
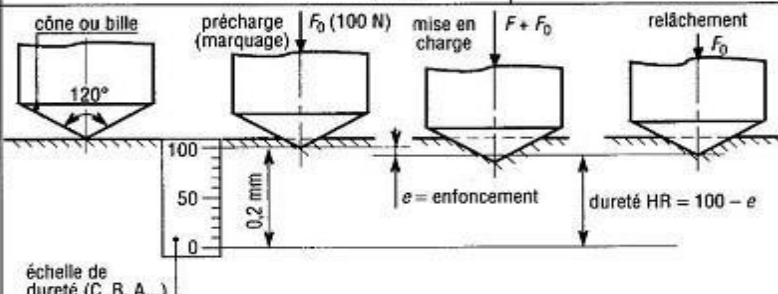
essai	symbole	principe et conduite de l'essai	
Brinell	HB		$HB = \frac{0,102 \times 2F}{S}$ avec $S = \frac{\pi d}{2} (d - \sqrt{d^2 - a^2})$ (F en N, a et d en mm)
Vickers	HV		$HV = 0,189 \frac{F}{d^2}$ avec $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ (F en N, d1 et d2 en mm)
Rockwell	HR		

Figure II.15 : Principaux essais de dureté [44].

II.11 Essais dynamiques

II.11.a Essais de résilience (choc)

Il arrive souvent que les matériaux de très bonnes qualités plastiques deviennent très fragiles sous l'action du choc. La résilience caractérise la résistance aux chocs des matériaux. C'est une caractéristique mécanique importante. L'essai est destiné à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette préalablement entaillée (Figure II.16). On utilise un mouton-pendule munit à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie donnée au moment du choc. Cette énergie est classiquement dans le cas de la norme européenne de 300 joules.

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis (Figure II.17). On détermine l'énergie absorbée exprimée en joule. D'autres caractéristiques peuvent être déterminées à partir de cet essai ; il s'agit, en particulière, de la cristallinité (taux de rupture fragile) ou de l'expansion latérale mesurée sur chaque éprouvette après essai. Nous verrons que le développement des analyseurs transitoires a permis d'instrumenter l'essai de résilience et de mesurer d'autres paramètres caractéristiques du comportement des matériaux à la température d'essai.

CHAPITRE II : Comportement d'un matériau composite à matrice thermodurcissable

L'énergie absorbée est obtenue en comparant la différence d'énergie potentielle entre le départ du pendule et la fin de l'essai. La machine est munie d'index permettant de connaître la hauteur du pendule au départ ainsi que la position la plus haute que la pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette.

L'énergie obtenue (en négligeant les frottements) est donnée par la formule II.23 :

$$W = m.g.h - m.g.h' \tag{II.30}$$

m : masse du mouton-pendule

g : accélération de la pesanteur (environ 9.81 m.s^{-2})

h : hauteur du mouton-pendule à sa position de départ

h' : hauteur du mouton-pendule à sa position

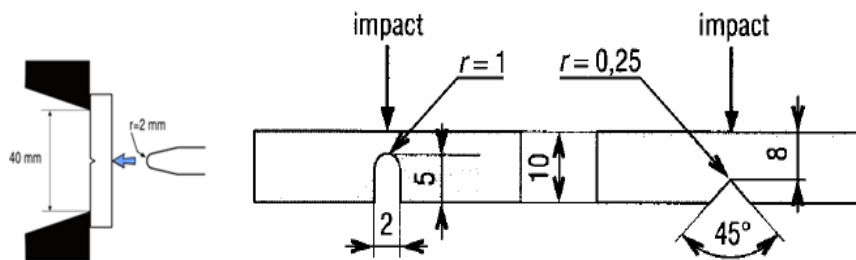


Figure II.16 : Forme des éprouvettes en U et en V.

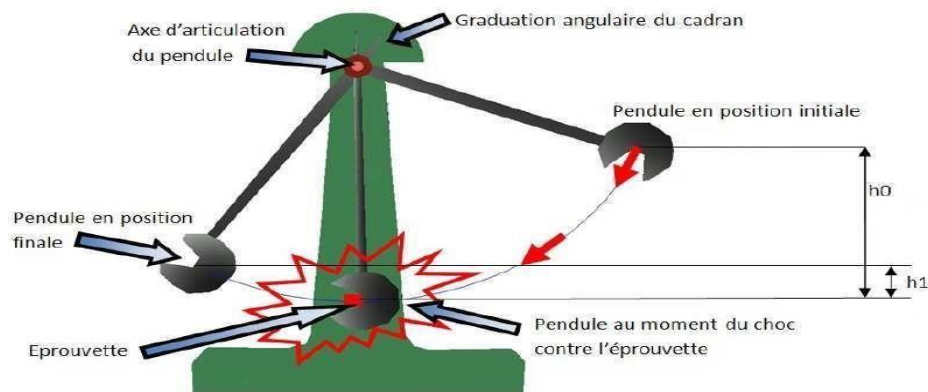


Figure II.17 : Essai de résilience.

La résilience est définie par la lettre K (joules /cm) :

$$K = \frac{\text{énergie absorbée } W}{\text{section au droit de l'entalle}}$$

III.11.b Fatigue des composites

Lorsqu'une structure est soumise à une charge d'intensité variable, elle est soumise à un phénomène de fatigue qui peut conduire à sa rupture bien que la charge reste à tout moment inférieure à sa résistance statique. Ce phénomène est lié à l'amorçage et la propagation d'une fissure à partir d'un défaut au sein de la structure, c'est-à-dire un ensemble de circonstances favorables à une décohésion locale du matériau du fait d'une forte concentration de contraintes. L'étude du comportement en fatigue des matériaux présente deux aspects. Le premier est lié à la prédiction de la durée de vie et conduit à l'obtention des courbes de Wöhler. Le deuxième consiste à étudier et identifier le dommage spécifique causé par la fatigue au sein du matériau, et à comprendre comment ce dommage conditionne la durée de vie.

II.11.b.1 Fatigue et endurance

La notion de fatigue ou d'endommagement en fatigue désigne la modification du comportement d'un matériau, suite à l'application répétée d'une sollicitation mécanique cyclique ; conduisant à une rupture prématurée de la pièce pour des amplitudes souvent bien inférieures aux caractéristiques observées en monotone [51]. L'endurance est la capacité du matériau à résister au phénomène de fatigue. Les paramètres caractéristiques d'un cycle de fatigue à déformation ou contrainte (σ) sinusoïdale imposée sont :

- l'amplitude maximale de la contrainte (déformation) atteinte au cours d'un cycle, notée σ_a , (ε_a) la valeur moyenne de la contrainte (déformation) σ_m , (ε_m)
- le rapport des contraintes maximale et minimale, et le paramètre R :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \qquad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

Un cycle sinusoïdal de fatigue est alors entièrement décrit par les trois paramètres :

σ_{\max} (ε_{\max}), R et f (fréquence de l'essai) [52]. On est parfois conduit à distinguer la composante alternative σ_a de la composante statique σ_m ; ainsi, selon les valeurs relatives de ces composantes, et les valeurs du rapport R on distingue plusieurs types de sollicitations (Figure II.24) :

- | | | |
|----------------------------|---------------------------|------------|
| ➤ alternée symétrique : | $\sigma_m = 0$ | R = -1 |
| ➤ alternée dissymétrique : | $0 < \sigma_m < \sigma_a$ | -1 < R < 0 |
| ➤ répétée | $\sigma_m = \sigma_a$ | R = 0 |

➤ ondulée $\sigma_m > \sigma_a$ $0 < R < 1$

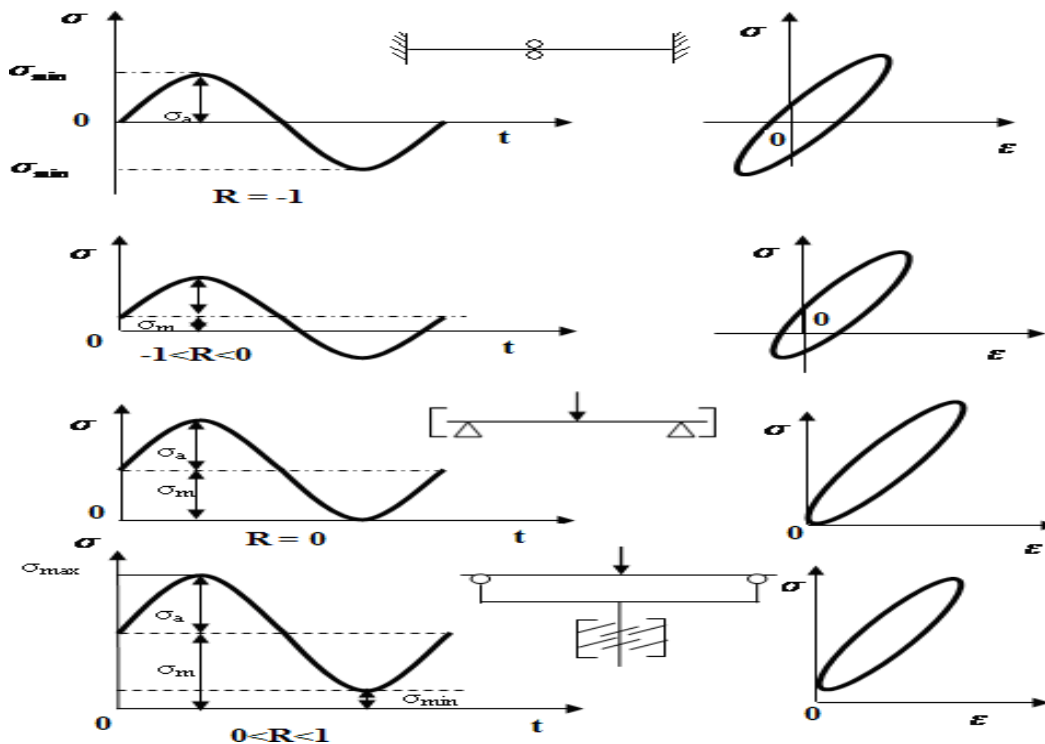


Figure II.18: Différents cas de sollicitations [41].

Pour $R=1$, on n'est plus dans la fatigue dynamique mais dans la fatigue statique (fluage, relaxation). Pour des conditions d'essai données (et en particulier pour un niveau ε_{\max} , ou σ_{\max} de sollicitations), on définit la durée de vie du matériau comme le nombre de cycles que le matériau peut supporter avant sa rupture.

II.11.b.2 Les principales caractéristiques et propriétés impliquées dans le comportement en fatigue d'un polymère [53]

- La structure et la composition chimique, la masse molaire et sa distribution, les états physiques.
- Le chargement mécanique du polymère peut générer la rupture de liaisons covalentes puis la croissance des fissures au cours du procédé de fabrication sous l'effet de la force de cisaillement.
- La déformation homogène comme la déformation élastique et viscoélastique. Quand la concentration de contraintes à la tête de la fissure est assez haute et la rupture n'intervient pas encore, la limite d'élasticité du matériau peut être atteinte. Dans le cas des polymères vitreux, le point maximal de la limite d'élasticité présente deux modes : La limite d'élasticité du cisaillement et la limite d'élasticité normale de la contrainte, mais le cas des polymères semi-cristallins est différent.

Ils sont parmi les polymères qui ont la meilleure tenue en fatigue. Cependant, le mécanisme de la déformation, la balance entre l'énergie dissipée et la résistance à la fissuration dépendent du mode de rupture.

- La déformation non-homogène comme la création de craquelures et bandes de cisaillement. La craquelure est différente dans le cas des polymères et dans le cas des autres matériaux comme les céramiques. La différence est qu'elle n'est pas une fissure réelle et elle nécessite une déformation plastique. Elle dépend du type de sollicitations, de la masse molaire et des paramètres de la fatigue comme, la fréquence, de paramètres environnementaux tels que la température et l'humidité. Ce phénomène se produit sous certaines conditions pour les polymères amorphes vitreux et quelques polymères semi cristallins. La formation de craquelures se traduit par une dissipation d'énergie et la résistance mécanique du matériau devient faible.
- Le phénomène de transition vitreuse de la matrice avec son changement d'état physique.
- Les modifications morphologiques comme l'orientation et la cristallisation.
- L'effet thermique induit par l'auto-échauffement.

II.11.b.3 Paramètres généraux qui influent sur la tenue en fatigue

Les paramètres les plus importants sont les paramètres liés au matériau, au chargement et à l'environnement. La Figure II. 19 montre bien cette influence.

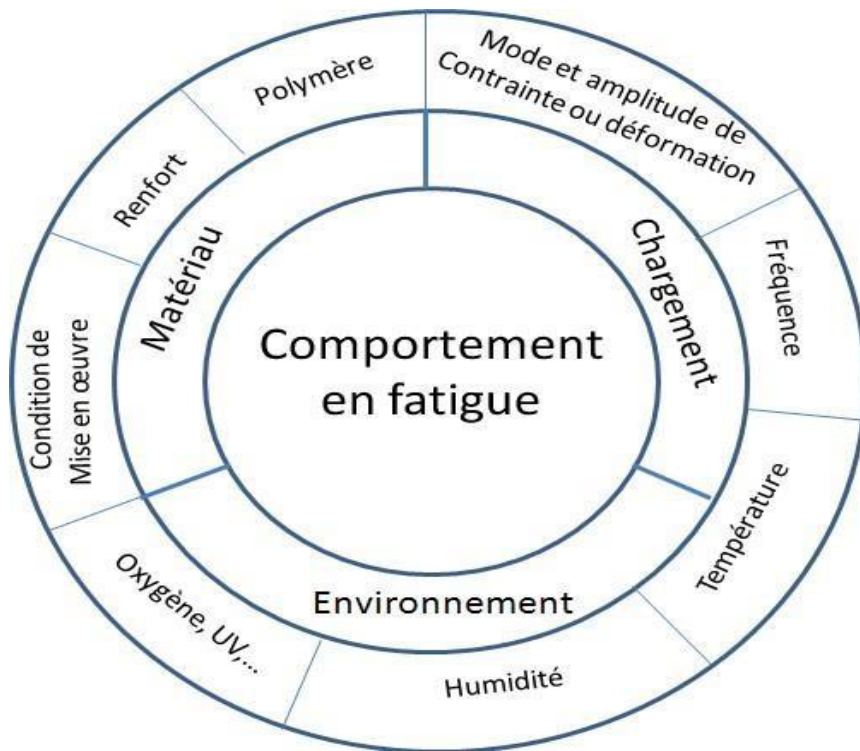


Figure II.19 : Schéma illustrant l'influence des paramètres sur le comportement en fatigue.[45]

❖ **Les paramètres liés au matériau peuvent être classés en deux groupes :**

- Les composants d'un matériau composite (matrice et renfort) ;
- Les conditions de mise en forme.

❖ **Les paramètres liés au chargement sont :**

Le mode et l'amplitude de la contrainte (ou déformation) imposée et la fréquence [54] .

❖ **Les paramètres liés à l'environnement sont :**

La température et les paramètres agressifs comme l'humidité, l'oxygène, les UV qui peuvent être la cause du vieillissement du polymère. La température peut être un facteur de l'environnement ou un facteur généré lors de la sollicitation. Quand on parle de la température extérieure, elle est un facteur de l'environnement mais quand on parle de la température induite par l'auto-échauffement, c'est un facteur qui dépend directement de la fréquence de sollicitation [55].

II.12 Analyse mécanique dynamique [46]

La caractérisation mécanique dynamique de nos échantillons passe par une analyse DMA ou DMTA (Dynamic Thermal Mechanical Analyser) sur une machine DMA50 issue de 01dB.

Le principe est décrit par la Figure II.20 et se base sur la mesure de déphasage entre le déplacement forcé d'un échantillon et la contrainte engendrée pour une excitation en traction-compression.

Les paramètres auxquels on accède par cette mesure sont :

- Le module de stockage, ou module de Young réel E' ;
- Le module de perte, ou module de Young imaginaire E'' ;
- L'angle de perte δ et le facteur de perte $\eta = \tan(\delta)$.

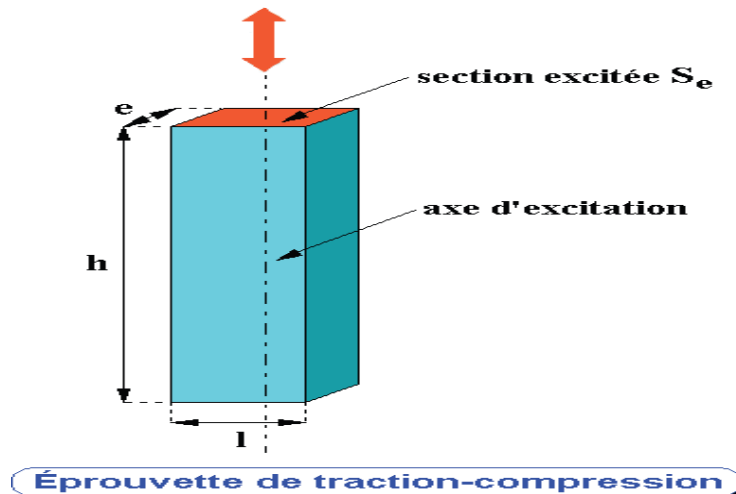


Figure II.20: Schéma de fonctionnement du DMA [46]

II.13 Endommagement des composites

Au cours de leur vie en service, les pièces peuvent être soumises à diverses sollicitations mécaniques dont les effets peuvent être aggravés par le facteur temps ou par un environnement plus ou moins agressif. Le comportement dépend en grande partie des paramètres microstructuraux. De par leur nature hétérogène, l'endommagement des matériaux composites est complexe ; il se manifeste généralement par la combinaison de trois modes : rupture de fibre, décohésion de l'interface fibre-matrice et fissuration de la matrice.

Ces mécanismes et la multiplicité des facteurs influençant la résistance du composite rendent difficile la description de son endommagement [56].

Ainsi, il existe des paramètres, tels que la fraction volumique, l'orientation des fibres, l'épaisseur des plis et l'espacement entre fibres, jouent un rôle très important dans la cinétique de l'endommagement.

II.13.1 Les différentes échelles d'observation de l'endommagement

Plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée, unidirectionnelle ou tissés qui se révèlent à différentes échelles d'observation (Figure II.21). Les plus significatifs sont les suivants : [47]

- A l'échelle microscopique apparaissent les ruptures d'interfaces : c'est le phénomène de décohésion fibre/matrice et d'autre part, la rupture de fibre, de la matrice ;
- A l'échelle macroscopique on observe le phénomène de décollement inter pli : c'est le délaminage ;
- A l'échelle mésoscopique on observe l'apparition de nombreuses fissures intra-laminaires mais également la rupture de fibres qui intervient au stade ultime de la ruine du matériau, qui sont parallèles à la direction des fibres [57].

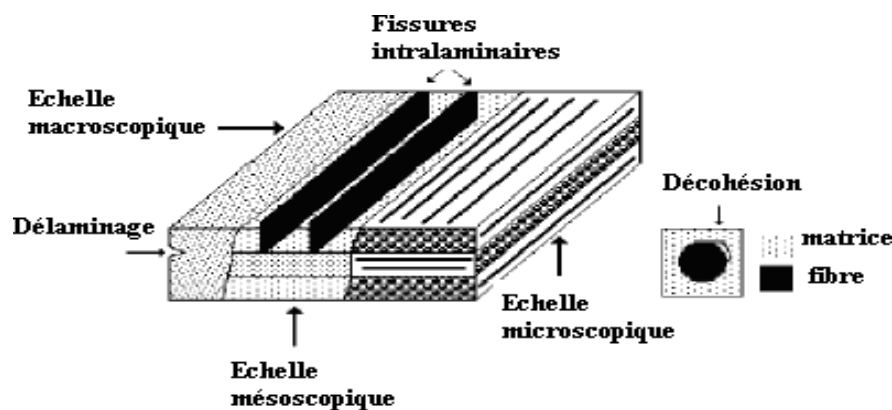


Figure II.21: Les différentes échelles d'observation de l'endommagement : illustration sur un matériau stratifié.

II.13.2 Modes de rupture [48]

L'état de propagation d'une fissure plane soumise à un système de forces, peut être ramené à la superposition de trois modes élémentaires de rupture (figure II.22).

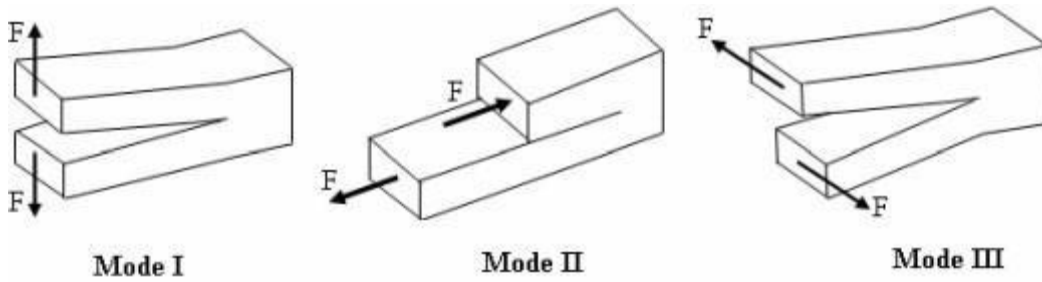


Figure II.22 : Différents modes de rupture

- Mode I ou mode d'ouverture : la charge appliquée est perpendiculaire au fond de fissure. Les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement l'une à l'autre. Ce mode correspond à une traction uniaxiale [58].
- Mode II ou mode de glissements droit : la charge appliquée est parallèle au plan de la fissure. Les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au fond de la fissure, il s'agit du cisaillement plan.
- Mode III ou mode de glissement vis : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure.

Deux ou trois modes de sollicitations peuvent exister simultanément, ce qui correspond aux modes mixtes. Cependant, les ruptures les plus dangereuses sont celles du mode I [49].

II.13.3 Les mécanismes d'endommagement

Les mécanismes d'endommagement d'un matériau hétérogène ne sont pas uniformément présents au sein du matériau. Ils dépendent notamment de la sollicitation, de l'architecture des constituants et de l'orientation des plis [47]. Un composite à matrice polymère soumis à une sollicitation mécanique, peut regrouper trois principaux modes différents [59] :

- ❖ Rupture des fibres ;
- ❖ Fissuration matricielle ;
- ❖ Rupture de l'interface fibre-matrice et déchaussement de fibre ;

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées.

II.13.3.a Rupture de fibre

La rupture de fibre (Figure II. 23) intervient soit à la première mise en charge soit au cours de la sollicitation. On peut dire que la fibre rompt si elle subit une contrainte supérieure à sa résistance. On aperçoit ce phénomène lors d'existence d'un défaut qui subit une concentration de contrainte [60].

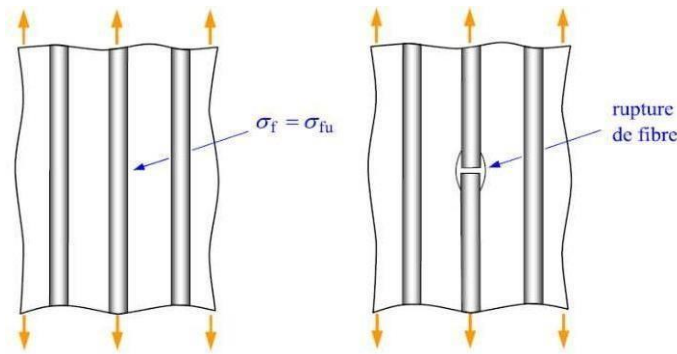


Figure II.23 : Rupture de fibre.

II.13.3.b Fissuration matricielle

Les matrices organiques étant des matériaux ductiles. La rupture finale intervient, après une initiation de la fissure et sa progression, dès que la contrainte à la rupture σ_R est atteinte. Ces fissures prennent naissance aux défauts présents dans le matériau lors de son élaboration.

En traction longitudinale, la fissuration de la matrice est soit transverse dans le cas où σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture en traction ; soit longitudinale dans le cas où la contrainte à la rupture en cisaillement est atteinte (Figure II.24). Ce dernier mode ne se produit que dans le cas où la contrainte de décohésion de l'interface est supérieure à la contrainte en cisaillement de la matrice. Dans le cas contraire, il y aura alors décohésion de l'interface [61].

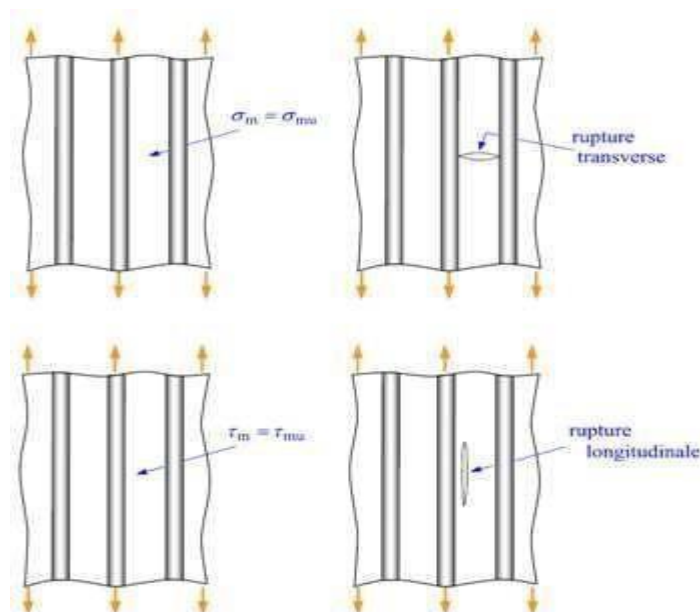


Figure II.24 : Rupture de la matrice.

Pour des déformations assez faibles, les fissures n'apparaissent que dans la matrice. L'application des charges cycliques fait augmenter le nombre de fissures. On parle de fissuration dispersée (Figure II.25). Par contre, pour des contraintes élevées, les fibres se cassent au bout de la longueur et permettent la propagation de fissures. C'est le mode de rupture localisé [62].

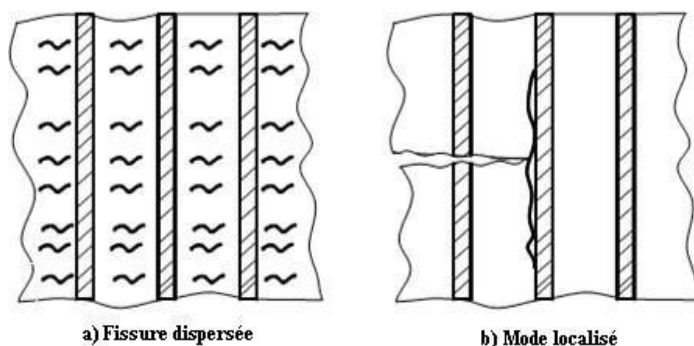


Figure II.25 : Modes de fissuration de la matrice

II.13.3.c Décohésion fibre-matrice

Dans un polymère renforcé par les fibres unidirectionnelles, la décohésion de l'interface intervient lorsque la contrainte de cisaillement τ dans la matrice atteint la contrainte de décohésion τ_d , et cela se produit quand cette dernière est inférieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice τ_m (Figure II.26) [1].

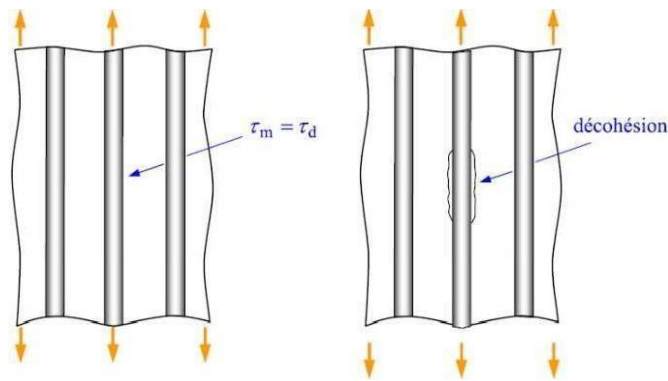


Figure II.26: Décohésion fibre-matrice.

II.14 Fissurations des composites stratifiés

Les matériaux composites stratifiés constitués de couches superposées renforcées de fibres unidirectionnelles, de tissus ou de mats peuvent présenter différents types de fissuration (inter-laminaire, intra-laminaire, ou trans-laminaire) [63]. Ces termes définissent les plans dans lesquels peuvent se développer les fissures dans les matériaux composites.

- **Fissures inter-laminaire** : la fissure se développe suivant un plan parallèle aux couches de renfort, entre deux couche (Figure II.27. a). Ce type d'endommagement se rencontre lors d'essais en mode I ou II, ou lors d'essais de flexion entre appuis rapprochés ;
- **Fissures Intra-laminaire** : le plan de la fissure est perpendiculaire ou parallèle aux couches de renfort à l'intérieure des couches (Figure II.27.b). Ce mode d'endommagement se rencontre lors d'essais de cisaillement ou de traction transverse sur matériau unidirectionnel par exemple ;
- **Fissures trans-laminaire** : le plan de la fissure est perpendiculaire aux couches et aux renforts (Figure II.27.c). Ce mode d'endommagement est par exemple observé lors d'essai de traction ou compression uniaxiale dans le sens des fibres [64].
-

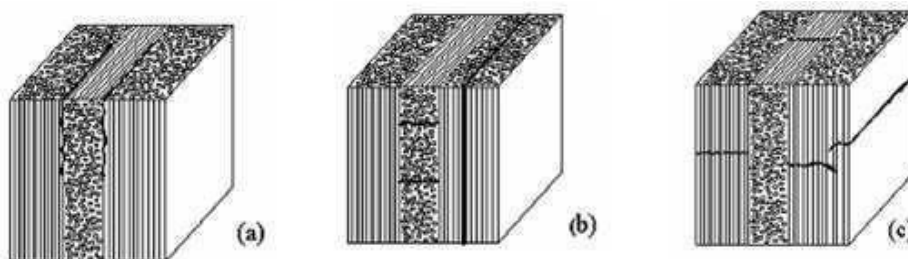


Figure II.27 : Différents types de fissuration au sein d'un composite stratifié.

Dans le cas des stratifiés, aux mécanismes élémentaires décrits précédemment (décohésion fibre matrice ; rupture longitudinale de la matrice ; rupture transverse de la matrice ; rupture des fibres) [65] s'ajoute un mécanisme de rupture entre couches, il est dit rupture par délaminage (Figure II.28).

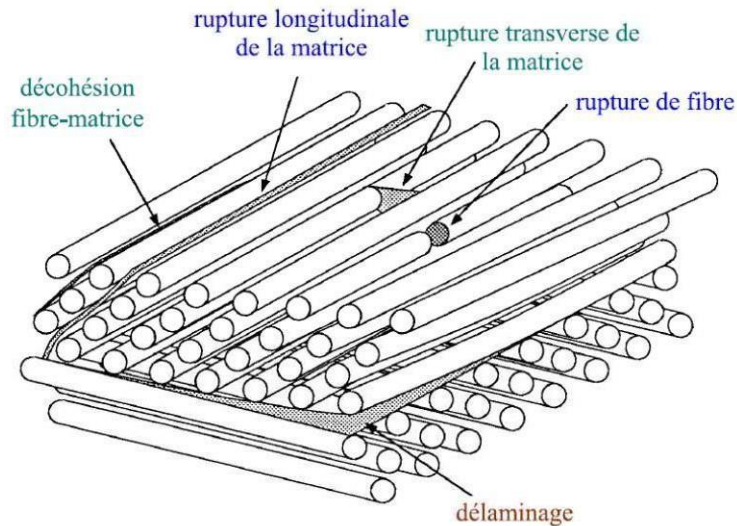


Figure II.28 : Mécanismes de rupture dans les stratifiés.

❖ Cas d'un stratifié croisé soumis à une traction dans la direction 0°

Dans le cas d'un stratifié croisé soumis à une traction dans la direction 0° (Figure II.29), le premier phénomène de rupture observé est celui de la fissuration des couches orientées à 90° . La fissuration se produit par rupture longitudinale de la matrice ou/et par rupture de l'interface fibre -matrice dans les couches orientées à 90° . Cette fissuration conduit à la formation des fissures orientées transversalement (Figure II.29) à la direction du chargement mécanique. Ainsi, cette fissuration initiale des couches à 90° est appelée fissuration transverse du stratifié croisé. Lorsque le chargement mécanique est augmenté, le nombre de fissures croît jusqu'à atteindre un état de saturation de la fissuration. Les fissures transverses créent en pointes de fissures, entre les couches orientées à 90° et à 0° des concentrations de contraintes qui conduisent à l'initiation puis à la propagation du délaminage à l'interface entre les couches. Ce délaminage se développe ensuite jusqu'à la rupture finale du stratifié par rupture des fibres et de la matrice dans les couches à 0° . La Figure II.30 montre l'aspect final de la surface après rupture [61].

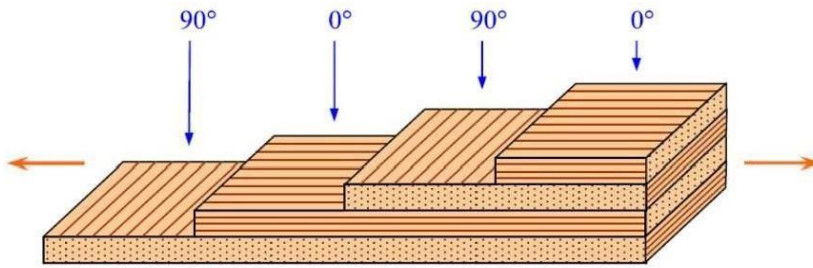


Figure II.29 : Stratifié croisé soumis à une traction dans la direction 0°.

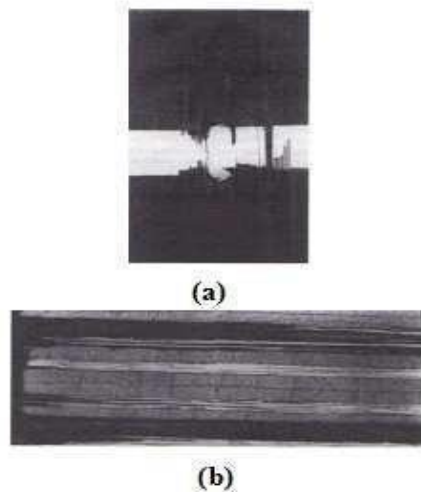


Figure II.30: Rupture en présence d'un trou d'un composite $[0^\circ/90^\circ]_{2S}$ à fibres de carbone. (a) Rupture macroscopique au droit de trou. (b) Bord de l'éprouvette loin du trou : les couches à 90° sont micro fissurées.

❖ Cas d'un stratifié croisé $\pm 45^\circ$, soumis à une traction longitudinale dans la direction 0° (Figure II.31)

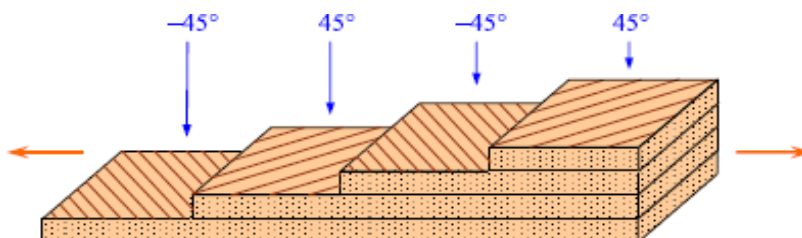


Figure II.31 : Stratifié croisé $\pm 45^\circ$ soumis à une traction dans la direction 0°.

Dans ce cas, on observe d'abord une rupture longitudinale dans les couches à $\pm 45^\circ$, suivie d'un délaminage entre les couches. La Figure II.32 donne un exemple de rupture observé dans ce cas.

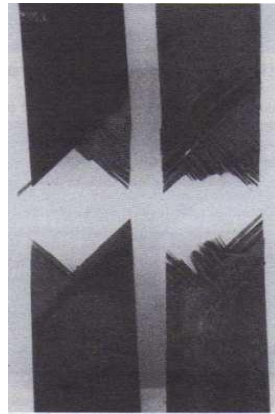


Figure II.32 Rupture d'un composite $[\pm 45^\circ]_{2S}$ à fibres de carbone.

II.15 Facteurs influençant la résistance du composite

Plusieurs facteurs agissent sur la résistance à la rupture des composites. Une analyse exacte de la rupture devient compliquée par la présence de contraintes résiduelles, par la nature hétérogène et anisotrope du matériau, par la présence de défauts et le manque de connaissance sur le comportement de l'interface.

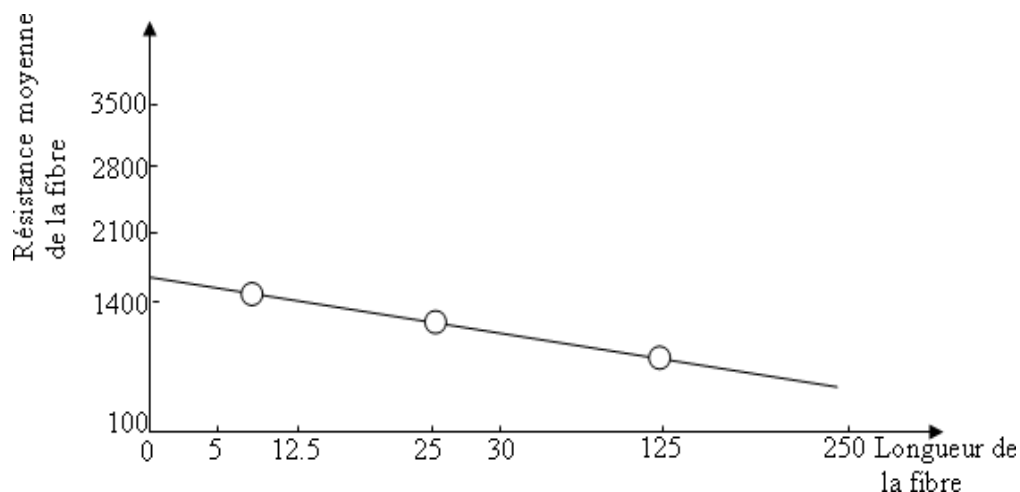


Figure II.33: Effet de la longueur d'une fibre de verre E sur la résistance moyenne de la fibre.

♦ La probabilité de trouver des défauts dans la fibre augmente quand sa longueur augmente, ce qui réduit sa résistance à la rupture (Figure II.33) [65] ;

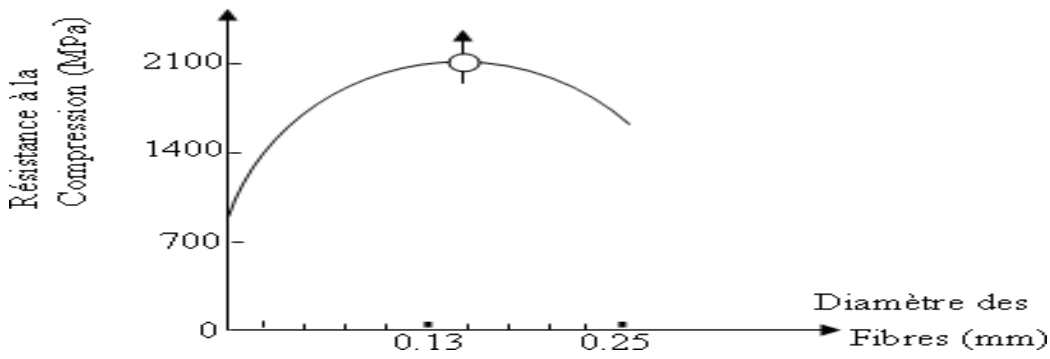


Figure II.34 Influence du diamètre des fibres de verre sur la résistance à la compression d'un composite.

♦ La résistance de la résine dépend de son degré de cuisson, de son degré d'homogénéité et du taux de porosité. Les figures II.34 [37] et II.35 et II.36 [50] montrent l'influence du taux de porosité sur la résistance au cisaillement et à la compression des matériaux composites

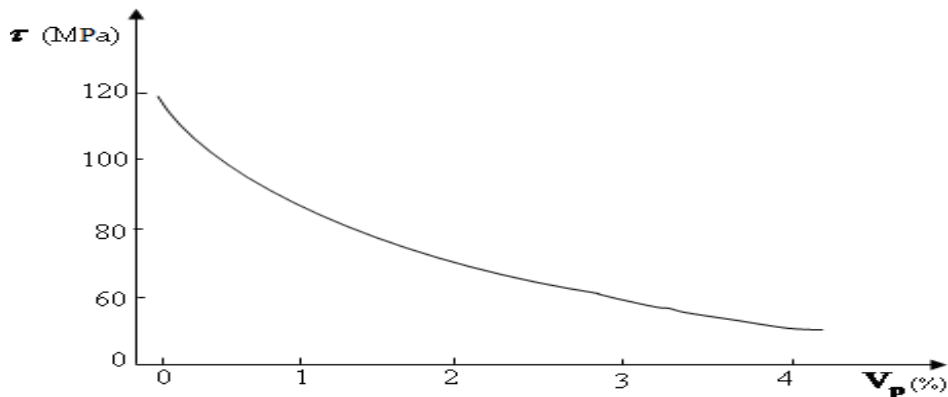


Figure II.35: Corrélation entre la résistance au cisaillement du composite et le taux de porosité.

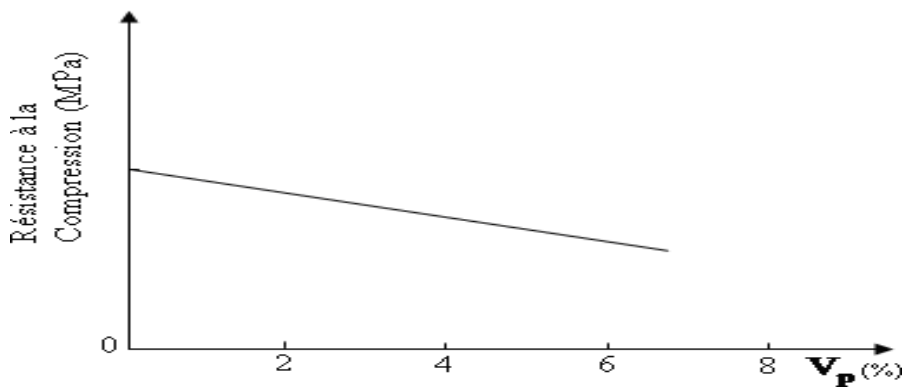


Figure II.36 : Influence du taux de porosité sur la résistance à la compression du composite à fibre de verre.


L'espace entre les fibres est aussi un paramètre important. La diminution de celui-ci augmente le risque de rupture brutale du composite.

II.16 Conclusion

La connaissance de l'état d'endommagement d'une structure travaillante en matériaux composites est une nécessité largement reconnue, et ce, tant pour des raisons de fiabilité, et par conséquent de sécurité.

Si on considère le cycle de vie d'un matériau, on s'aperçoit qu'à chaque étape de sa vie, il est soumis obligatoirement à différentes conditions d'exposition au cours de laquelle ce matériau voit ses propriétés initiales décroître en totalité ou en partie jusqu'à atteindre un seuil minimal qui définit la durée de vie du matériau ou sa durabilité.

L'endommagement désigne toute altération des propriétés d'un matériau au cours du temps, ces propriétés peuvent être des caractéristiques mécaniques, physico-chimique, ...etc.



Chapitre III

Etude expérimentale

III.a Partie A

III.a.1 Introduction

Nous examinons et analysons les résultats des expériences de traction sur des échantillons d'un matériau composite « polyester insaturé / fibres de verre / sciure de bois » dans la première partie de l'aspect appliqué.

Dans le matériau composite, on retrouve du polyester insaturé renforcé par des fibres de verre, avec des proportions différentes, en ajoutant de la sciure de bois à des proportions de 00%, 01%, 05%, 10%.

Grâce aux résultats obtenus lors des expériences de traction des échantillons, nous parvenons à déterminer et à comprendre le comportement mécanique optimal.

III.a.1.1 Matériau composite

Un matériau composé est formé en mélangeant deux ou plusieurs matériaux constitutifs ; considéré comme un matériau de renforcement.

La résine constitue la base de ces matériaux, qui ne se fondent pas et ne fusionnent pas ensemble, mais plutôt s'unissent pour former un nouveau matériau avec des propriétés spécifiques.

Il existe plusieurs méthodes pour fabriquer un matériau composite, dont la méthode du moule fermé.

On peut utiliser des méthodes telles que le moulage par compression, le moulage par injection ou le moulage par transfert.

– Dans le cas où l'on utilise la méthode du moule ouvert, il exist

+e plusieurs techniques qui en font partie.

Cela inclut la technique de Pulvérisation - Pose de ruban - Tissage de filaments - Durcissement en autoclave. La méthode la plus importante est la pose manuelle ou ce qu'on appelle l'empilage manuel.

III.a.1.2 Matériau de renfort

Ce matériau est ajouté à la résine afin d'obtenir des propriétés mécaniques et physiques que la résine ne possède pas [67], et ce en employant des fibres synthétiques ou naturelles comme renforts [68]. Il s'agit notamment des fibres de carbone et de la fibre de verre, qui fait l'objet de notre étude.

III.1.3 Sciure

C'est un sous-produit de l'industrie du bois et il est souvent utilisé dans la production d'engrais. Il se caractérise par son extrême légèreté et sa forme irrégulière Figure III.1.



Figure III.1 sciure de bois

❖ Balayage d'images au microscope électronique de sciure :

On peut observer sur la Figure III .2 le balayage d'images au microscope électronique de la sciure.

Il a été remarqué qu'il y avait une couche fibreuse au-dessus des particules de sciure de bois, qui est caractérisé par une teneur élevée en carbone, ce qui signifie qu'elle contient un pourcentage élevé de carbone qui aide à adhérer au matériau de base - le polyester insaturé utilisé dans cette recherche.

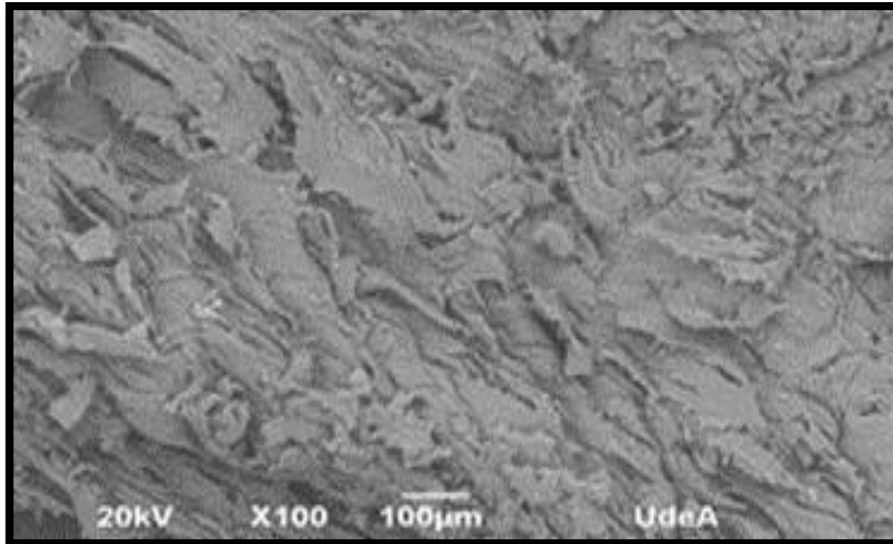


Figure III .2 Balayage d'images au microscope électronique de la sciure de bois

III.a.2 Contribution à la recherche et objectifs

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de l'incorporation de sciure de bois dans un matériau.

On utilise un composite à base de polyester insaturé renforcé de fibres de verre aléatoires, dont les proportions de poids sont de 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 % et 90 %.

En réalisant des essais de traction sur l'ensemble des spécimens, nous abordons les étapes et les procédures spécifiques associées aux essais de traction.

III.a.3 Matériels et Méthodes :

Nous avons divisé les matériaux utilisés dans le processus d'échantillonnage en deux ensembles.

III.a.3.1 - Ensemble 1 :

Dans cet ensemble d'échantillons, nous avons utilisé :

III.a.3.1.1 Un moule en verre

III.a.3.1.2 Une résine à base de polyester insaturé

À laquelle un durcisseur a été ajouté pour stimuler et accélérer la réaction.

Les fibres de polyester absorbent l'humidité dans des conditions normales de 0,5 % d'humidité absorbée à des températures normales, et le degré de saturation ne dépasse pas 0,8 % et ne gonfle pas dans l'eau sauf d'un petit pourcentage.

Le matériau en polyester résiste au chauffage pendant une longue période sans désintégration significative, car le point de fusion du polyester est de 249 degrés Celsius, qui est le point de fusion le plus élevé pour les fibres chimiques [69].

Chapitre III : Etude Expérimentale

Le polyester saturé a été sélectionné pour ses diverses propriétés et caractéristiques, notamment sa facilité de fabrication, sa rentabilité, sa résistance à la chaleur, sa résistance à l'isolation électrique, sa résistance chimique élevée, sa bonne résistance aux conditions environnementales difficiles, etc.

La résine de polyester insaturé est la plus couramment utilisée. Elle se compose d'un alcool –polyhydrique et d'un alcool acide multiple, qui se lient avec l'ajout d'un catalyseur à une température appropriée.

Les propriétés mécaniques du polyester insaturé utilisé dans cette recherche :

- Densité1200 Kg/m³
- Résistance à la traction42 MPA
- Module d'élasticité.....2.8 GPA
- Allongement.....3,2 %

III.a.3.1.3 Durcisseur-catalyseur

Il s'agit d'une substance généralement ajoutée à la résine « polyester insaturé » dans un rapport entre 2 % et 3 % afin de favoriser un durcissement complet du polyester insaturé et d'accélérer la réaction. Il convient de mentionner qu'il n'est pas recommandé d'utiliser un durcisseur de plus de 3 % pour accélérer le durcissement du mélange, car cela provoquerait des fissures dans le matériau.

- Un matériau de renfort de fibre de verre de type E a été utilisé. Il s'agissait de type MAT en fibre de verre aléatoire d'une densité de 300 gr/m². Figure III.3



Figure III.3. Matériau de renforcement "Fibre de verre"

Chapitre III : Etude Expérimentale

Nous avons utilisé de la fibre de verre MAT type E (300 gr/m²). Quant à ses propriétés mécaniques, elles incluent :

- Densité2500 Kg/m³
- Résistance à la traction..... 2400 MPa
- Module d'élasticité85 GPA
- Allongement0,01 %

III.a.3.2 LOT II

Nous avons procédé comme suit : Un moule a été fabriqué en utilisant un matériau en verre épais. (Figure III.4)



Figure III.4 Moule en verre

Une résine à base de polyester insaturé, à laquelle un durcisseur a été ajouté. Ce dernier est un matériau catalyseur utilisé pour accélérer la réaction.

La sciure à raison de 01%, a été utilisée directement. On néglige souvent le facteur d'humidité.

Le matériau additif (sciure de bois) a été préparé selon les étapes suivantes :

- La sciure a été séchée au four à 100 °C pendant 24 h pour éliminer l'humidité.
- Le matériau a été ensuite broyé à l'aide d'un moulin électrique.
- Et enfin, il a été tamisé à l'aide d'un tamis à mailles de 2 mm.

III.a.3.3 Préparation des éprouvettes :

Dans un laboratoire de l'Université de Skikda, nous avons procédé à la réalisation des échantillons.

Nous avons préparé deux ensembles d'éprouvettes selon les protocoles et la phase spécifique de préparation des échantillons, en tenant compte de la température du laboratoire de 25°C.

Chapitre III : Etude Expérimentale

III.a.3.3.1 Ensemble I

Ces éprouvettes étaient constituées d'un matériau composite composé de polyester insaturé (300 gr/m²) de fibres de verre de type E orientées de manière aléatoire à différents rapports pondéraux : 00 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 100 %.

III.a.3.3.2 Ensemble II

Ces éprouvettes étaient constituées d'un matériau composite composé de polyester insaturé contenant de la fibre de verre de type E (300 gr/m²) orientée de manière aléatoire à différents rapports pondéraux : 00 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 100 %, auxquels de la sciure de bois a été ajoutée (1 % en poids). La Préparation et la pesée massique du premier jeu d'éprouvettes (résine polyester insaturé/renforcement) ont été effectuées.

Ce processus a été réalisé à l'aide d'une balance électronique. La résine de polyester insaturé utilisée dans cette recherche avait une densité de 1,2 g/cm³ pour une dimension d'échantillon de 20 cm de longueur 2 cm de largeur 2 mm d'épaisseur. Les échantillons résultants, avec 9,6 g de poids net total chacun, ont été pris comme référence pour faire varier la masse de la résine de polyester insaturé avec des ratios de fibres de verre de 00 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 100%. Les résultats de la première série sont présentés dans les tableaux III.1 et III.2.

Nous utilisons le codage suivant tout au long de la première partie de ce chapitre :

- polyester insaturé : po
- Masse de fibre de verre : gf
- Masse de sciure : sd

Matrice " sciure =0	Masse de résine polyester insaturé (g)	Masse de fibre de verre (g)
po100/ gf 00/sd 00	9.60g	00g
Po 90 / gf 10/sd 00	8.64g	0.96g
Po 80 / gf 20/sd 00	7.68g	1.92g
Po 70 / gf 30/sd 00	6.72g	2.88g
Po 60 / gf 40/sd 00	5.76g	3.84g
Po 50 / gf 50/sd 00	4.80g	4.80g
Po 40 / gf 60/sd 00	3.84g	5.76g
Po 30 / gf 70/sd 00	2.88g	6.72g
Po 20 / gf 80/sd 00	1.92g	7.68g
Po 10 / gf 90/sd 00	0.96g	8.64g

Tableau III.1 Tableau de codage des états rapports massiques résine polyester insaturé/masse fibre de verre.

Chapitre III : Etude Expérimentale

Matrice " sciure =0	Rapports massiques de résine polyester insaturé %	Masse de fibre de verre (%)
Po100/ gf 00 /sd 00	100%	00%
Po 90 / gf 10 /sd 00	90%	10%
Po 80 / gf 20 /sd 00	80%	20%
Po 70 / gf 30 / sd 00	70%	30%
Po 60 / gf 40 /sd 00	60%	40%
Po 50 / gf 50 /sd 00	50%	50%
Po 40 / gf 60 /sd 00	40%	60%
Po 30 / gf 70 /sd 00	30%	70%
Po 20 / gf 80 /sd 00	20%	80%
Po 10 / gf 90 /sd 00	10%	90%

Tableau III.2 Rapports massiques résine polyester insaturé % / renfort fibre de verre %.

Préparation et pesée massique du deuxième jeu d'éprouvettes (résine polyester insaturé/armature/sciure de bois :

- Ces échantillons ont été préparés et pesés en fonction de la masse de la résine de polyester insaturé, la masse de fibre de verre et la masse de sciure de bois, avec une plage d'erreur admissible de 10 mg g et 10 mg g de précision.

Ceci a été réalisé en utilisant une balance électronique (Figure. III.5).



Figure III.5 Balance électronique

Nous avons pesé la masse de résine polyester insaturée d'une densité de 1,2 g/cm³ utilisée dans cette étude, et les dimensions de l'échantillon étaient de 20 cm de long x 2 cm de large x 2 mm d'épaisseur. Le résultat : un poids net total de 9,60 grammes par échantillon. Ceci est considéré comme une référence pour modifier la proportion massique de matériau polyester insaturé et la

Chapitre III : Etude Expérimentale

proportion massique de **matériau** fibre de verre : 00 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 100 %, tandis que le rapport pondéral de la résine polyester insaturée est : 00 %, 09 %, 19 %, 29 %, 39 %, 49 %, 59 %, 69 %, 79 %, 89 %, 99 %, +01% sciure de bois. Les résultats du deuxième ensemble sont présentés dans les tableaux III.3 et III.4.

Matrice	Rapports massiques de résine polyester insaturé %	Masse de fibre de verre (%)	Masse de sciure (%)
Po99/ gf 00 /sd01	99%	00%	01%
Po 89 / gf 10 /sd01	89%	10%	01%
Po 79 / gf 20/sd01	79%	20%	01%
Po 69 / gf 30 /sd01	69%	30%	01%
Po 59 / gf 40/sd01	59%	40%	01%
Po 49 / gf 50/sd01	49%	50%	01%
Po 39 / gf 60/sd01	39%	60%	01%
Po 29 / gf 70/sd01	29%	70%	01%
Po 19 / gf 80/sd01	19%	80%	01%
Po 09 / gf 90/sd01	9%	90%	01%

Tableau **III.3** Table de codage des états Rapports massiques de résine polyester insaturé/Masse de fibre de verre + 01% Masse de sciure

Rapports massiques polyester insaturé / % fibre de verre / 01 % de sciure	% résine	Masse de bloc polyester insaturé (g)	Masse de fibre de verre(g)	Masse de sciure(g)
Po99/ gf 00 /sd 01		9.504g	00g	0.096g
Po 89 / gf 10 /sd 01		8.544g	0.960g	0.096g
Po 79 / gf 20/sd 01		7.584g	1.92g	0.096g
Po 69 / gf 30 /sd 01		6.624g	2.88g	0.096g
Po 59 / gf 40/sd 01		5.664g	3.84g	0.096g
Po 49 / gf 50/sd 01		4.704g	4.80g	0.096g
Po 39 / gf 60/sd 01		3.744g	5.76g	0.096g
Po 29 / gf 70/sd 01		2.784g	6.72g	0.096g
Po 19 / gf 80/sd 01		1.824g	7.68g	0.096g
Po 09 / gf 90/sd 01		0.864g	8.64g	0.096g

Tableau **III.4** Rapports pondéraux du matériau en résine de polyester insaturé et du renfort en fibre de verre + 01 % en poids de sciure ajoutée.

Alors que les étapes précédentes avec l'ajout de 05% de sciure du tableau **III.5** et du tableau **III. 6**.

Chapitre III : Etude Expérimentale

Matrice	Rapports massiques de résine polyester insaturé %	Masse de fibre de verre (%)	Masse de sciure (%)
Po 95/ gf 00 /sd 05	95%	00%	05%
Po 85 / gf 10 /sd 05	85%	10%	05%
Po 75 / gf 20/ sd 05	75%	20%	05%
Po 65 / gf 30 / sd 05	65%	30%	05%
Po 55 / gf 40/ sd 05	55%	40%	05%
Po 45 / gf 50/ sd 05	45%	50%	05%
Po 35 / gf 60/ sd 05	35%	60%	05%
Po 25 / gf 70/ sd 05	25%	70%	05%
Po 15 / gf 80/ sd 05	15%	80%	05%
po 05 / gf 90/ sd 05	5%	90%	05%

Tableau III.5 Table de codage des états rapports massiques de résine polyester insaturé/Masse de fibre de verre + 05% Masse de sciure

Rapports massiques % résine polyester insaturé / % fibre de verre / 05 % de sciure	Masse de bloc polyester insaturé (g)	Masse de fibre de verre(g)	Masse de sciure(g)
Po95/ gf 00 /sd 05	9.12g	00g	0.48g
Po 85 / gf 10 /sd 05	8.16g	0.960g	0.48g
Po 75 / gf 20/ sd 05	7.2g	1.92g	0.48g
Po 65 / gf 30 / sd 05	6.24g	2.88g	0.48g
Po 55 / gf 40/ sd 05	5.28g	3.84g	0.48g
Po 45 / gf 50/ sd 05	4.32g	4.80g	0.48g
Po 35 / gf 60/ sd 05	3.36g	5.76g	0.48g
Po 25 / gf 70/ sd 05	2.4g	6.72g	0.48g
Po 15 / gf 80/ sd 05	1.44g	7.68g	0.48g
Po 05 / gf 90/ sd 05	0.48g	8.64g	0.48g

Tableau III.6 Rapports pondéraux du matériau en résine de polyester insaturé et du renfort en fibre de verre + 05 % en poids de sciure de bois ajoutée

Et ajouter 10 % de sciure du tableau III. 7 et du tableau III. 8.

Chapitre III : Etude Expérimentale

Matrice	Rapports massiques résine polyester insaturé	deMasse de fibre de verre (%)	Masse de sciure(%)
Po90/ gf 00 /sd10	90%	00%	10%
Po 80 / gf 10 / sd10	80%	10%	10%
Po 70 / gf 20/ sd10	70%	20%	10%
Po 60 / gf 30 / sd10	60%	30%	10%
Po 50 / gf 40/ sd10	50%	40%	10%
Po 40 / gf 50/ sd10	40%	50%	10%
Po 30 / gf 60/ sd10	30%	60%	10%
Po 20 / gf 70/ sd10	20%	70%	10%
Po 10 / gf 80/ sd10	10%	80%	10%
Po 00 / gf 90/ sd10	00%	90%	10%

Tableau III.7 Table de codage des états Rapports massiques de résine polyester insaturé/Masse de fibre de verre + 10 % Masse de sciure

Rapports massiques % résine polyester insaturé / % fibre de verre / 10 % de sciure	Masse de polyester insaturé (g)	bloc Masse de Fibre de verre(g)	Masse de sciure(g)
Po90/ gf 00 /sd10	8.64g	00g	0.96g
Po 80 / gf 10 / sd10	7.68g	0.960g	0.96g
Po 70 / gf 20/ sd10	6.72g	1.92g	0.96g
Po 60 / gf 30 / sd10	7.76g	2.88g	0.96g
Po 50 / gf 40/ sd10	4.8g	3.84g	0.96g
Po 40 / gf 50/ sd10	3.84g	4.80g	0.96g
Po 30 / gf 60/ sd10	2.88g	5.76g	0.96g
Po 20 / gf 70/ sd10	1.92g	6.72g	0.96g
Po 10 / gf 80/ sd10	0.96g	7.68g	0.96g
Po 00 / gf 90/ sd10	00g	8.64g	0.96g

Tableau III.8 Rapports pondéraux du matériau en résine de polyester insaturé et du renfort en fibre de verre + 10 % en poids de sciure de bois ajoutée

III.a. 3.4 Méthode

Les éprouvettes du premier ensemble ont été réalisées en un matériau composite constitué de polyester insaturé renforcé de fibres de verre orientées aléatoirement de type E (300gr/m²) dans des proportions pondérales de 00%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% selon la méthode suivante :

III.a.3.4.1 Première série : Po / gf /sd 00

Chapitre III : Etude Expérimentale

Une fine couche de vaseline a été étalée sur la surface du moule pour permettre un retrait facile du composite. 2% en poids d'un durcisseur ont été ajoutés au polyester insaturé et le mélange a été soigneusement mélangé. Ensuite, une première quantité du mélange a été versée dans le moule et étalée à l'aide d'un pinceau pour assurer une répartition homogène. Ensuite, des fibres de verre aléatoires ont été coupées aux dimensions du moule et étalées sur le mélange. Enfin, le mélange restant a été versé sur la couche de fibre de verre et roulé à l'aide d'un rouleau métallique (Figure III. 6) pour assurer une répartition et une élimination uniformes des bulles d'air.



Figure III.6 Rouleau métallique

III.a.3.4.2 Le deuxième ensemble : Po / gf /sd 01

Les mêmes étapes suivies pour la préparation du premier jeu d'échantillons ont été effectuées ; la seule différence étant l'ajout de sciure de bois (01%wt). Après avoir ajouté le reste du mélange de polyester insaturé avec de la fibre de verre en utilisant un rouleau métallique pour garantir une répartition régulière. Il convient de noter que le processus de versement du mélange et de préparation des échantillons doit être effectué rapidement pour éviter un durcissement du mélange avant la fin de la préparation. On a obtenu dix (10) éprouvettes de matériau composite renforcé de fibres de verre, dont la densité est de 300g/m^2 .

Dans la dernière étape, l'échantillon est laissé à température modérée pendant 48 heures jusqu'à ce qu'il sèche et durcisse avant d'être soumis à un essai de traction (Figure III.7). La température est de 25 degrés Celsius, qui est la température du laboratoire.

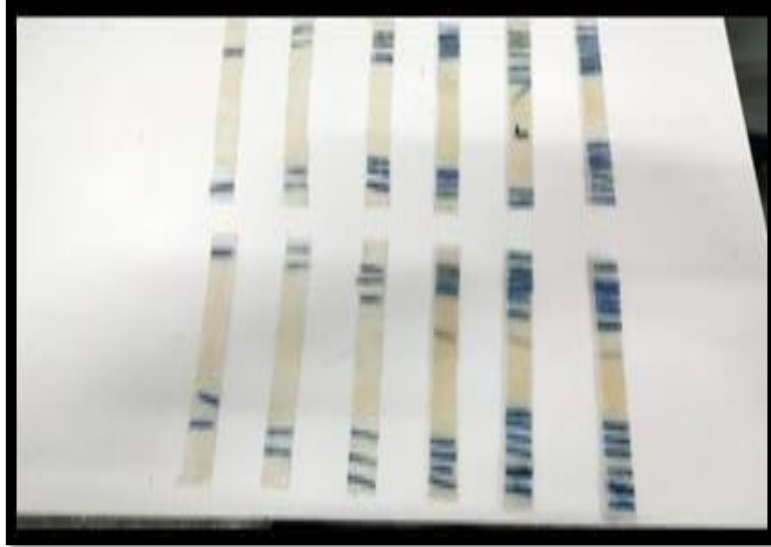


Figure III.7 Échantillons du matériau composite

III.a.3.4.3 Le troisième ensemble : Po / gf /sd 05

Les mêmes étapes suivies pour la préparation du premier jeu d'échantillons ont été effectuées ; la seule différence étant l'ajout de sciure de bois (05% wt)

III.a.3.4.4 Le quatrième ensemble : Po / gf /sd 10

Les mêmes étapes suivies pour la préparation du premier jeu d'échantillons ont été effectuées ; la seule différence étant l'ajout de sciure de bois (10 % en poids). La Figure III.8 montre les micrographies des composites : Po 70 / gf 20/ sd10 et Po 69 / gf 30 /sd01.

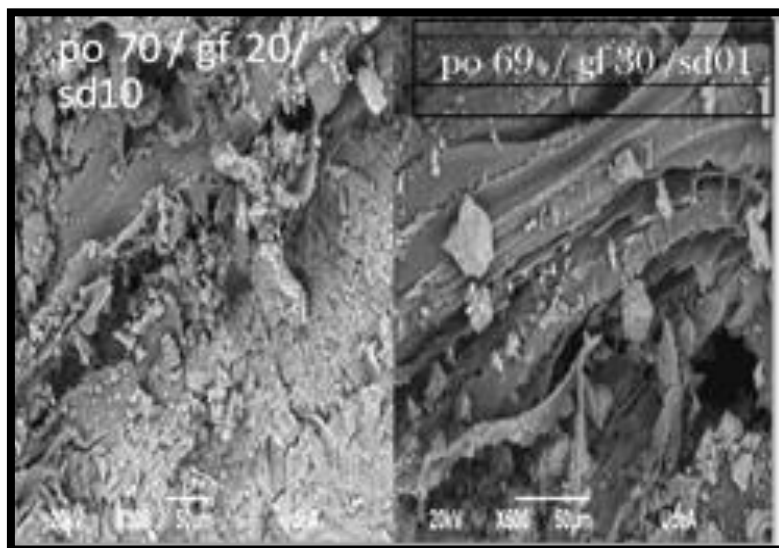


Figure III.8 Micrographies des composites : Po/gf/sd

III.a.4 Essai de traction

Les spécimens ont été préparés dans les dimensions suivantes : 20 cm de longueur x 2 cm de largeur x 2 mm d'épaisseur.

Les essais ont été réalisés au Laboratoire de Mesures Mécaniques du Département des Mines de l'Université Badji Mokhtar Annaba (Algérie) à l'aide d'une machine d'essai Zwich Roell de type Z 50 -KN50 (Figure III. 9).



Figure III.9 Machine d'essai Zwich Roell type Z 50 -50 KN.

Les éprouvettes ont été fixées axialement aux deux extrémités et une charge a été progressivement appliquée à un taux de 50 kg/min en partant de zéro jusqu'à la rupture de l'éprouvette tout en enregistrant la limite d'élasticité et la déformation plastique. La Résistance à la traction exprime la contrainte de rupture du composite selon la relation suivante :

- F la contrainte maximale qui conduit à la rupture de l'éprouvette exprimée en Newton « N ».
- B largeur de l'éprouvette exprimée en mm.
- e épaisseur de l'éprouvette exprimée en mm.

III.a.4.1 Étapes de l'examen

- ✓ La longueur de l'échantillon (L_0), sa largeur (b_0) et son épaisseur (t_0) sont mesurées avant de procéder à l'essai.
- ✓ L'échantillon est installé dans le dispositif d'essai général illustré à la figure III.9, avec l'appareil calibré avant d'effectuer l'essai.
- ✓ La force en (kN) est appliquée au modèle d'essai de manière hydraulique et progressive, et les lectures de la force appliquée pour chaque allongement sont prises et enregistrées.
- ✓ Le processus de téléchargement se poursuit jusqu'à ce que le modèle tombe en panne et soit interrompu, puis le modèle est téléchargé à partir de l'appareil et des mesures sont prises après la

Chapitre III : Etude Expérimentale

panne, dont nous avons besoin dans les calculs, comme cela sera mentionné plus tard.

Remarque : Les machines modernes affichent souvent automatiquement les résultats des tests après la rupture, si les dimensions de l'échantillon ont été saisies dans la machine avant et après le test. Dans le cas contraire, la machine sortira les valeurs de charge et d'allongement dessinées dans une courbe ou des valeurs tabulées.

Le calcul des propriétés se fait comme suit :

- ✓ Contrainte : elle est calculée en divisant la charge par la surface de la section initiale. Le résultat est appelé contrainte géométrique (sa valeur diffère de la contrainte réelle).
- ✓ Déformation : Elle se calcule en divisant l'allongement par la longueur initiale du paramètre, et s'appelle la déformation géométrique (sa valeur diffère de la déformation réelle).
- ✓ La courbe contrainte-déformation technique peut être tracée sur la base des valeurs précédemment calculées.
- ✓ La résistance à la traction est la valeur de contrainte la plus élevée dans la courbe contrainte-déformation.
- ✓ La limite d'élasticité est déterminée par le critère d'élasticité requis, la limite d'élasticité neutre et la limite d'élasticité à l'expansion totale de la courbe.
- ✓ Calculer les valeurs de ductilité, qui sont (pourcentage d'allongement et pourcentage de diminution de surface) sur l'échantillon après rupture.
- ✓ Le module d'élasticité est calculé à partir de la pente de la première partie droite de la courbe.

La machine de traction Allround Line Z050 convient aux applications les plus diverses. Les machines d'essai utilisées (modèle classique et sol) de la gamme Allround Line Z050 étaient équipées de forces d'essai de 50 kN.

III.a.5 Résultat et discussion

III.a.5.1 Résultats de traction pour le premier ensemble Po / gf /sd 00

Des essais de traction ont été réalisés sur le premier groupe d'éprouvettes de matériaux composites polyester insaturé renforcé de fibres de verre (300gr/m²) avec différents rapports pondéraux. Les résultats de la résistance à la contrainte R_m sont exprimés en MPA selon le tableau III.9.

Chapitre III : Etude Expérimentale

Matrice + sciure =00	Section S (mm ²)	Résistance à la traction R _m (MPa)
Po100/ gf 00/sd00	20	1,55
Po 90 / gf 10/sd00	20	52,53
Po 80 / gf 20/sd00	20	63,18
Po 70 / gf 30/sd00	20	66,92
Po 60 / gf 40/sd00	20	61,10
Po 50 / gf 50/sd00	20	54,01
Po 40 / gf 60/sd00	20	48,13
Po 30 / gf 70/sd00	20	/
Po 20 / gf 80/sd00	20	/
Po 10 / gf 90/sd00	20	/

Tableau III.9 Résultats de la traction pour la première série.

III.a.5.2 Résultats des essais de traction pour le deuxième ensemble : Po / gf /sd 01

Les tests de traction ont été effectués sur le deuxième ensemble d'éprouvettes comprenant un composite à base de polyester insaturé renforcé de fibres de verre (300 g/m²) à différents rapports pondéraux auxquels 01 % en poids de sciure de bois a été ajouté. Les résultats sont présentés dans le tableau III.10.

Matrice	Section S (mm ²)	Résistance à la traction R _m (MPa)
Po99/ gf 00 /sd01	20	8,43
po 89 / gf 10 /sd01	20	55,42
Po 79 / gf 20/sd01	20	65,02
Po 69 / gf 30 /sd01	20	68,28
Po 59 /gf 40/sd01	20	60,32
Po 49 / gf 50/sd01	20	53,28
Po 39 / gf 60/sd01	20	47,85
Po 29 / gf 70/sd01	20	/
Po 19 / gf 80/sd01	20	/
Po 09 / gf 90/sd01	20	/

Tableau III.10 Résultats de résistance à la traction d'un matériau composite à base de polyester insaturé renforcé par des fibres de verre + 1 % de sciure de bois.

Chapitre III : Etude Expérimentale

III.a.5.3 Résultats des essais de traction pour le troisième ensemble : ensemble : Po / gf /sd 05

Les tests de traction ont été effectués sur le troisième ensemble d'éprouvettes comprenant un composite à base de polyester insaturé renforcé de fibres de verre (300 g/m²) à différents rapports pondéraux auxquels 05 % en poids de sciure de bois ont été ajoutés «tableau III.11 » .

Matrice	Section S (mm ²)	Résistance à la traction R _m (MPA)
Po95/ gf 00 /sd 05	20	15,20
Po 85 / gf 10 /sd 05	20	58,04
Po 75 / gf 20/ sd 05	20	68,02
Po 65 / gf 30 / sd 05	20	65,88
Po 55 / gf 40/ sd 05	20	58,04
Po 45 / gf 50/ sd 05	20	50,98
Po 35 / gf 60/ sd 05	20	42,08
Po 25 / gf 70/ sd 05	20	/
Po 15 / gf 80/ sd 05	20	/
Po 05 / gf 90/ sd 05	20	/

Tableau III.11 Résultats de résistance à la traction d'un matériau composite à base de polyester insaturé renforcé par des fibres de verre + 05 % de sciure de bois.

III.a.5.4 Résultats des essais de traction pour le quatrième ensemble : Po / gf /sd 10

Les tests de traction ont été effectués sur le quatrième ensemble d'éprouvettes comprenant un composite à base de polyester insaturé renforcé de fibres de verre (300 g/m²) à différents rapports pondéraux auxquels 10 % en poids de sciure de bois ont été ajoutés « tableau III.12 ».

Matrice	Section S (mm ²)	Résistance à la traction R _m (MPA)
Po 90/ gf 00 /sd10	20	20,45
Po 80 / gf 10 / sd10	20	56,98
Po 70 / gf 20/ sd10	20	66,09
Po 60 / gf 30 / sd10	20	62,56
Po 50 / gf 40/ sd10	20	54,13
Po 40 / gf 50/ sd10	20	45,12
Po 30 / gf 60/ sd10	20	/
Po 20 / gf 70/ sd10	20	/
Po 10 / gf 80/ sd10	20	/
Po 00 / gf 90/ sd10	20	/

Tableau III.12 Résultats de résistance à la traction d'un matériau composite à base de polyester insaturé renforcé de fibres de verre + 10 % de sciure de bois

III.a.5.5 les Graphiques

Le logiciel « Vernier Graphical Analysis Pro (Vernier, États-Unis) » a été utilisé pour traiter les résultats des essais de traction. Au cours de l'expérience, la section de l'échantillon et sa longueur effective sont généralement mesurées, et c'est à partir de ces données que la contrainte et l'allongement sont déterminés. Dans les applications techniques, la section initiale est mesurée pour la facilité et la longueur initiale, et les valeurs d'allongement sont enregistrées.

La résistance à la traction est égale à la traction maximale que l'éprouvette peut supporter et est définie en fonction de sa dépendance à la section de l'éprouvette. Après avoir dépassé les points de résistance à la traction, le matériau est dit défaillant ou défectueux, car il n'est pas possible d'éviter de casser une des pièces de la machine après avoir dépassé le point de résistance à la traction. Dans cette étude, nous prenons les valeurs de résistance à la traction pour tous les échantillons et entrons les données pour les expériences de traction, et les courbes suivantes ont été obtenues figure III.10, figure III.11 figure III.12 :

Des tests de traction pour un composé à base de polyester insaturé renforcé de fibre de verre Po%/gf%/sd% avec modification des proportions du matériau de renforcement en fibre de verre.

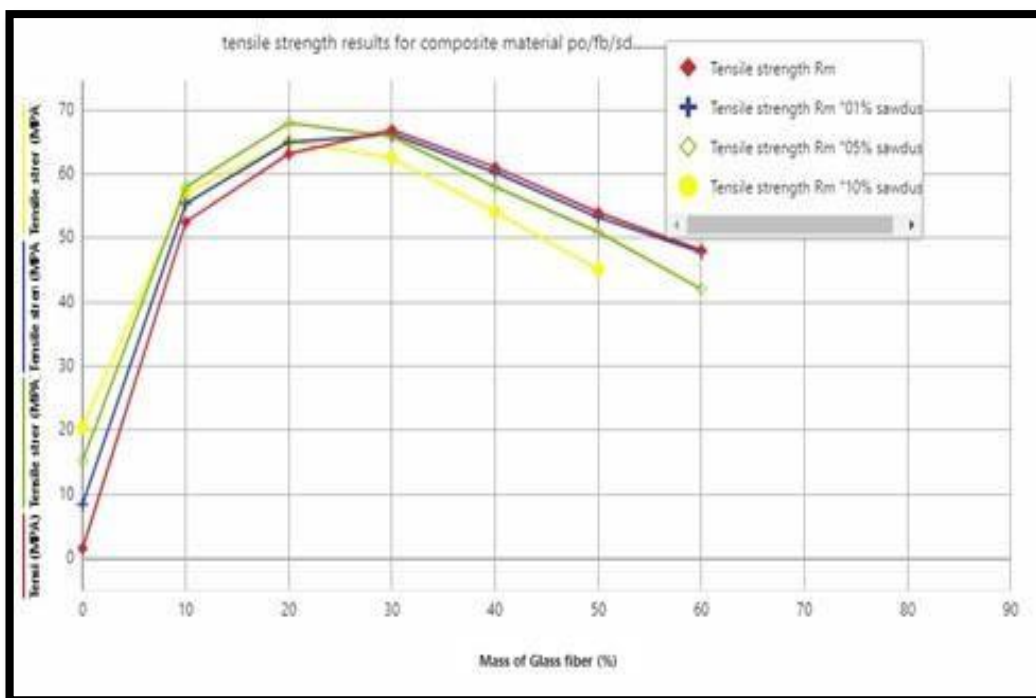


Figure III.10 Résultats moyens en traction d'un renfort en matériau composite po% / gf% / sd% avec différentes proportions de sciure de bois.

Chapitre III : Etude Expérimentale

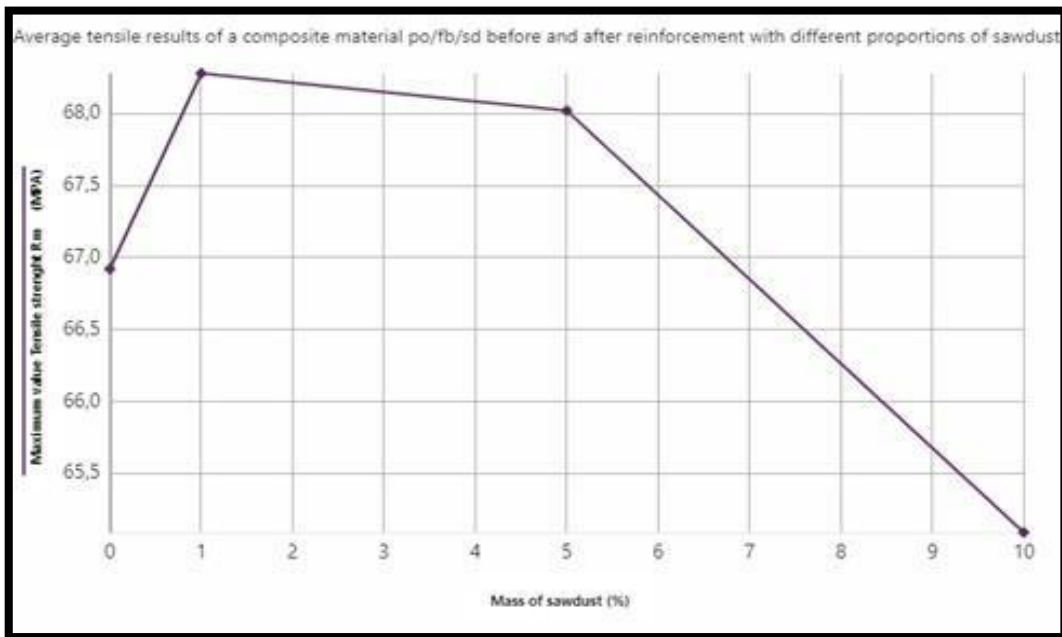


Figure III.11 Résultats d'essais de traction pour un composite à base de polyester insaturé renforcé de fibres de verre po% /gf% / sd% avec des proportions changeantes de matrice-polyester insaturé.

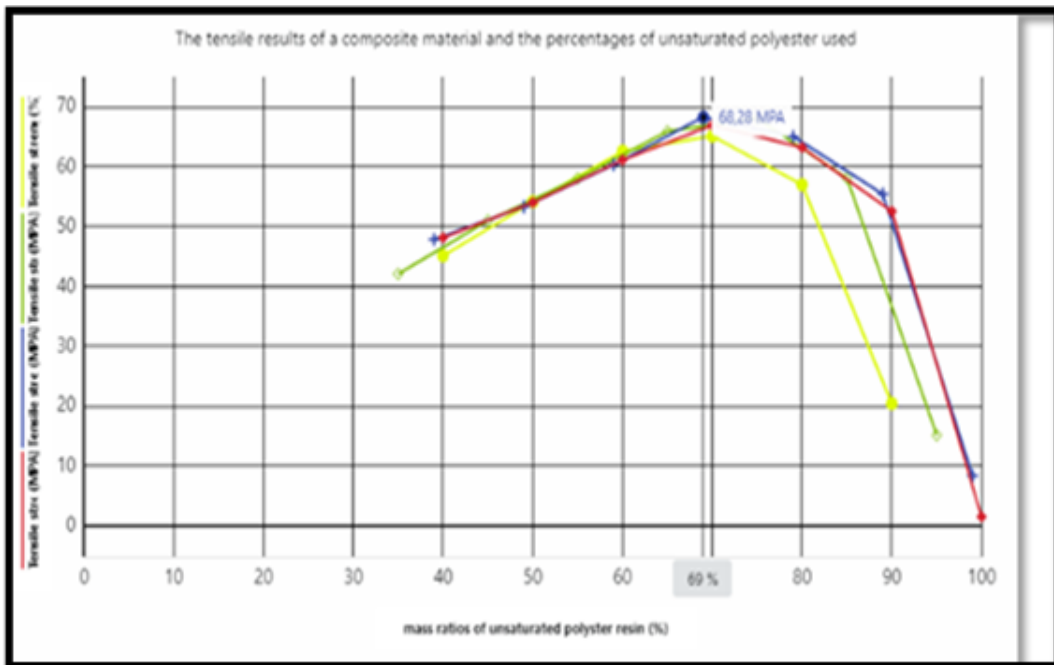


Figure III.12 Résultats des essais de traction po% / gf% / sd% par po%

III.a.5.6 Discussion et Analyse

➤ Figure III.10

On peut remarquer à travers les résultats des essais de traction pour les quatre groupes po% / gf% / sd%, l'évolution de la résistance par rapport aux proportions du matériau de renfort - fibres de verre à polyester insaturé.

En effet, cette résistance augmente significativement avec l'ajout de 10 % en poids et continue d'augmenter jusqu'à 30 % d'ajout où elle atteint son maximum. Au-delà de cette valeur et à partir de 40 %, elle commence à diminuer progressivement et lentement, pour finalement atteindre la résistance à la traction minimale de 60 % de l'armature. Au-delà de cette valeur et jusqu'à 90% du renfort, il est difficile d'obtenir les résultats d'expériences de traction du fait de la fragilité des échantillons du matériau composite et de l'impossibilité de sa réalisation dans certains cas. Ceci peut s'expliquer par le fait que la quantité de résine polyester insaturée n'est pas suffisante pour garantir l'accrochage du matériau de renfort.

* ce qui conduit à fragiliser le matériau et à réduire sa résistance à la traction à partir de 60 % jusqu'à 90 % du renfort, il est impossible de réaliser ces échantillons.

Lors de l'interprétation des courbes des quatre groupes po% / gf% / sd% pour les ratios du matériau de support ou de renforcement « fibre de verre », les points les plus importants étaient les suivants :

- La résistance à la traction du second groupe po/ gf /sd 01 est meilleure que celle du premier groupe po/ gf /sd 00 pour les proportions 00%, 10%, 20%, 30%.
- La résistance à la traction du troisième groupe po/ gf /sd 05 est meilleure que celle du deuxième et premier groupe pour les proportions 00%, 10%, 20%, 30%.
- La résistance à la traction du quatrième groupe po/gf/sd 10 est meilleure que celle du troisième, deuxième et premier groupe pour les proportions 00%, 10%, 20%, 30%.
- La résistance à la traction du premier groupe est meilleure que celle des deuxième, troisième et quatrième groupe avec des pourcentages de 40%, 50%, 60%.
- La résistance à la traction du deuxième groupe est meilleure que celle des troisième et quatrième

Chapitre III : Etude Expérimentale

groupes avec des pourcentages de 40%, 50%, 60%.

- La résistance à la traction du troisième groupe po/ gf /sd 05 est meilleure que celle du quatrième groupe po/ gf /sd 10 pour 40%, 50%, 60%.

On peut clairement voir que l'additif (sciure de bois) dans le deuxième groupe po100/ gf 00 /sd 01 et le troisième groupe po100/ gf 00 /sd 05 et le quatrième groupe po100/ gf 00 /sd 10 aux proportions 00% - 10% - 20% - 30% des fibres de verre ont joué le rôle de renfort, où l'on remarque que la valeur de la résistance à la traction est dans une tendance haussière avec l'augmentation du pourcentage de sciure durant cette zone 00% - 30% de matériau de renforcement

On constate une diminution significative des résultats de résistance à la traction pour les quatre groupes au-delà de la valeur maximale à 30 %. Cependant, les échantillons du deuxième groupe montrent une baisse plus rapide par rapport aux échantillons du premier groupe, le troisième groupe montre une baisse plus rapide par rapport aux échantillons du deuxième et premier groupe, et le quatrième groupe montre également une baisse plus rapide par rapport aux échantillons des troisième, deuxième et premier groupe.

- **Champ de crête**

On peut voir que la valeur maximale de la résistance à la traction des quatre groupes po% / fb / sd % est confinée au champ de crête entre 20 % - 30 % des rapports du matériau de renforcement ou du matériau de renforcement.

➤ **Figure III.11**

- **Point pic :**

C'est la valeur maximale. En interprétant les résultats et les courbes, on constate que la valeur du point pic de résistance à la traction de chaque matériau composite du premier groupe (po 70 /gf 30/sd 00) est d'environ (MPa 66,92), tandis que dans le deuxième groupe le composite de groupe (po 69/gf 30/sd01) est constitué de 69 % de polyester insaturé renforcé avec 30 % de fibre de verre ajoutée à 01 % de sciure de bois, dans lequel nous avons enregistré les valeurs suivantes : le point culminant de la résistance à la traction est approximativement 68,28 MPA. Cette valeur est la meilleure par rapport aux autres ratios et aux résultats des composites des groupes restants. Le troisième groupe (po 75/gf 20/sd 05) est constitué de 75% poly insaturé composé d'ester et renforcé de 20 % de fibre de verre ajoutée à 05 % de sciure de bois. La valeur maximale du point de résistance à la traction est d'environ 68.02 MPA.

Pour le quatrième groupe de composites (po 70/fb20/sd 10), nous avons enregistré une valeur de point de pic pour la résistance à la traction d'environ 66,09 MPA et nous avons remarqué une

Chapitre III : Etude Expérimentale

convergence entre les valeurs de point de pic parmi les quatre groupes.

• Plage de pic

On peut voir que la valeur maximale de la résistance à la traction des quatre groupes po% / gf% / sd est confinée à la plage de pic entre 01% -10% des proportions de l'additif.

➤ **Figure III.12 :**

Dans la troisième courbe, le pourcentage de variation du matériau de base "polyester insaturé" est représenté par rapport aux valeurs de résistance à la traction obtenues. On observe que les valeurs de résistance à la traction sont mesurées à partir de 35 % du matériau de base "polyester insaturé" pour le composite polyester/fibres de verre (po/gf/sd 00), et à partir de 40 % du matériau de base "polyester insaturé" pour le composite polyester/fibres de verre/sciure (po100/gf 00/sd). Les quatre groupes suivent une courbe ascendante jusqu'à ce que la "gamme des pics" soit située entre 65 % et 75 % de polyester insaturé, indiquant une quantité suffisante de résine de polyester insaturé pour assurer l'adhérence entre le matériau de renfort - fibres de verre - et l'additif - sciure de bois. Ensuite, on observe une diminution des valeurs pour les quatre groupes, atteignant jusqu'à 100 % de polyester insaturé.

Pendant la phase de déclin de 75 % à 100 % du pourcentage du matériau de base "polyester insaturé", on note que les valeurs de résistance à la traction pour le premier groupe (po/gf/sd 00) sont meilleures que celles du deuxième groupe (po/gf/sd 01) auquel on ajoute 01 % de sciure de bois. Le groupe avec 01 % de sciure est lui-même meilleur que le troisième groupe (po/gf/sd05) avec ajout de 05 % de sciure, et ce dernier est meilleur que le quatrième groupe (po/gf/sd10) avec ajout de 10 % de sciure de bois. Cette observation s'explique par le fait que la quantité de résine de polyester insaturé n'est pas suffisante pour assurer la liaison entre le matériau de renforcement - fibres de verre - et l'additif - sciure de bois, car ce dernier devient une charge supplémentaire affaiblissant la garantie d'adhérence du matériau de renforcement.

Le champ de crête : montre que la valeur maximale de la résistance à la traction des quatre groupes (po/gf/sd %) est confinée entre 65 % et 75 % de la matrice ou des rapports de matrice.

III.a.6 Conclusion

L'utilisation de matériaux composites, tels que les polymères renforcés de fibres, est très répandue dans les produits industriels. Dans ce chapitre, nous décrivons le matériel utilisé et les méthodes de préparation des éprouvettes. Les points les plus importants qui peuvent être tirés des résultats de la recherche sont les suivants :

- 65% à 75% de la masse du matériau de base (polyester insaturé) par rapport à la masse totale de l'échantillon de matériau • Renfort ou entre 20% et 30% de la masse du renfort – Polyester insaturé
- Entre 1% et 10% massique d'additif – sciure –
- Relation de corrélation et d'intégration entre le pourcentage de matériau de base, le pourcentage de matériau de renforcement et le pourcentage d'additif dans ces zones [70]

III.b Partie B « Analyse Statistique » :

III.b.1 Introduction

Dans cette section, nous étudions l'impact du temps d'immersion dans l'eau de mer, ainsi que celui du nombre et des diamètres des couches de fibres, sur les propriétés mécaniques d'un matériau composite à matrice polyester renforcé par des fibres de verre. En parallèle, nous avons développé de manière approfondie une base de données en explorant diverses variables, notamment :

- La nature du matériau de renforcement, qui varie entre une disposition aléatoire de "mat" avec des poids de 300 g/m², 450 g/m² et 600 g/m², ainsi qu'un type de tissu "roving" pesant 500 g/m².
- Le nombre de couches de matériau de renfort, s'étendant de 1 à 3 couches.
- La durée d'immersion dans l'eau de mer, avec des intervalles allant de 0 jours, 3 jours, 21 jours à 30 jours.

Cette section du chapitre détaillera les méthodologies expérimentales, accompagnées des essais correspondants. Les données expérimentales seront soumises à une analyse statistique, suivie d'une interprétation approfondie des résultats au cours d'une discussion, avant de parvenir à une conclusion.

III.b.2 Procédures expérimentales

Une technique de moulage a été utilisée pour fabriquer les stratifiés qui contiennent 1 couche et 3 couches de fibres avec une surface de 300 mm 300 mm. La résine de polyester insaturé a été choisie comme matrice et le durcisseur et le promoteur correspondants ont été inclus dans l'ingrédient. Le principe de fabrication est que les fibres et la résine polyester, ont été réalisées en une seule fois en commençant par la résine polyester, suivie des seconds plis de fibres. Les plaques ont été imprégnées à température ambiante, puis mises sous vide à une pression de 25 kPa pendant 24 heures à l'intérieur du moule. Pour chaque essai, nous utilisons deux types de fibres (voir figure III.14) et un type de résine polyester dont les propriétés mécaniques sont données dans le tableau III.13.

Partie B « Analyse Statistique »

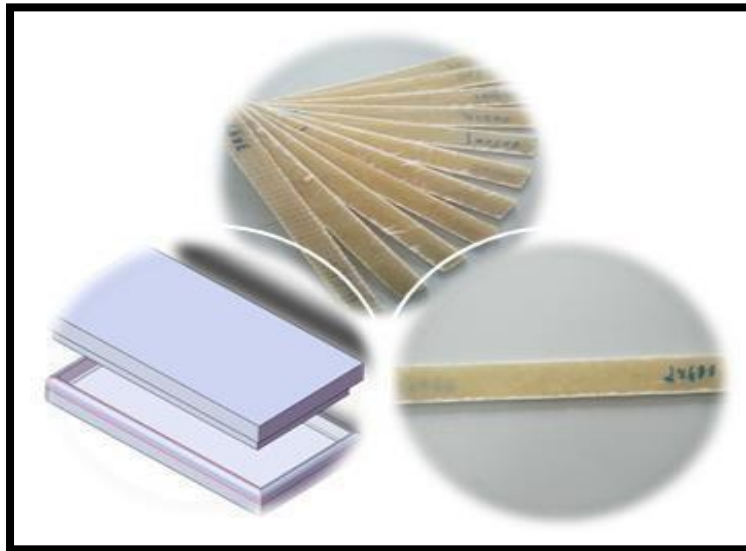
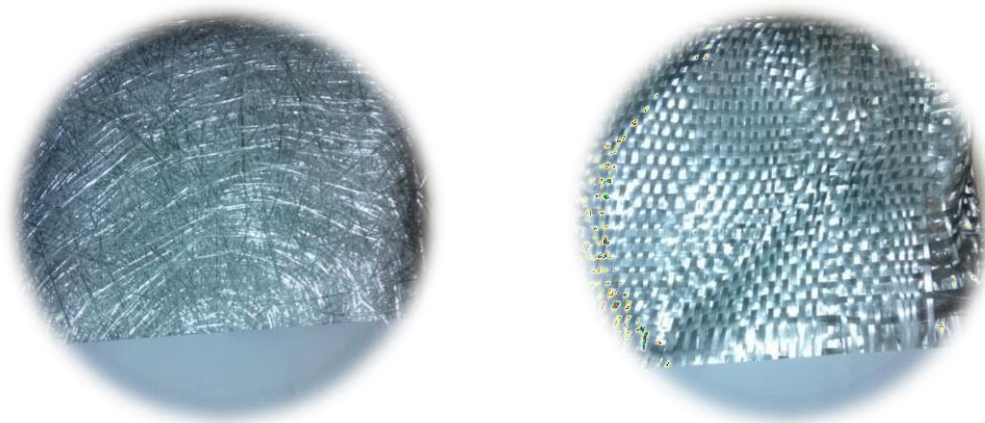


Figure III.13 Le dispositif expérimental de fabrication des plaques



(a) Mat en fibre de verre

(b) Mèche en fibre de verre

Figure III.14. Type de Fibres

Tableau III.13. Propriétés mécaniques des fibres de verre et de la résine polyester

	Densité	La force de traction	Module d'élasticité	Élongation
Résine de polyester	1200	42	2.8	3.2
Fibre de verre	2500	2400	85	0.01
Unité	Kg/m^3	MPa	GPa	%

Chapitre III.B : Analyse

La scie à diamant est utilisée pour découper les stratifiés qui mesurent 200 mm de longueur et 20 mm de largeur. La figure III.13 montre la géométrie et les dimensions des éprouvettes d'essai de traction sur la base de la norme standard (EN ISO 527). Les échantillons sont divisés en trois groupes correspondant à différentes périodes d'immersion dans l'eau, chaque groupe contenant 8 stratifiés. Trois temps d'immersion sont considérés : 3, 21 et 30 jours dans l'eau de mer en laboratoire (Voir Figure III.14).

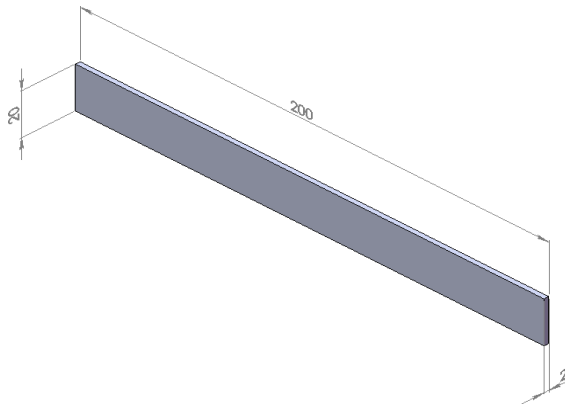
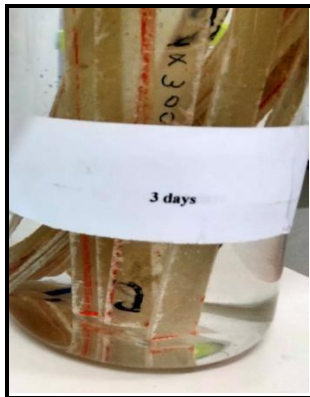


Figure III.15. La géométrie et les dimensions de l'essai de traction



a). 03-jours



b). 21-jours



c). 30-jours

Figure III.16 Différentes périodes d'immersion en eau de mer au laboratoire

Pour les ensembles d'immersion de durées de 3 jours, 21 jours et 30 jours, la mesure initiale de l'épaisseur des échantillons a été réalisée à l'aide d'un pied à coulisse numérique avant leur immersion dans l'eau. Les mesures ont été ensuite prises à nouveau jusqu'à ce que le temps d'immersion prédéfini soit atteint. Le tableau III.14 montre l'épaisseur de l'échantillon des fibres à 1 couche et à 3 couches avant et après chaque période d'immersion dans l'eau de mer.

Partie B « Analyse Statistique »

Tableau III.14. Épaisseur de l'échantillon

		300 g/m ²		450 g/m ²		600 g/m ²		500 g/m ²	
		1-couche	3-couches	1-couche	3-couches	1-couche	3-couches	1-couche	3-couche
03-jours	Avant	2	2	2	2	2	2	2	2
	Après	2.17	2.24	2.13	2.21	2.10	2.19	2.07	2.11
21-jours	Avant	2	2	2	2	2	2	2	2
	Après	2.72	2.79	2.70	2.77	2.65	2.72	2.52	2.61
30-jours	Avant	2	2	2	2	2	2	2	2
	Après	2.81	2.95	2.80	2.92	2.73	2.88	2.64	2.66

III.b.3 Essais expérimentaux

La machine de traction Zwick/Roell Z050 a été employée pour la réalisation d'essais de traction et de fatigue. La cellule de charge (dynamomètre) est reliée à une chaîne d'acquisition permettant l'enregistrement simultané du temps, du déplacement, de la charge et de la déformation. Ces données sont automatiquement stockées et traitées à l'aide du logiciel TestXpert V9.01 (voir Figure IV.5).

Le test de traction a été utilisé pour analyser la réaction des composites verre-époxy sous une charge de tension [70]. Le principe fondamental de cet essai consiste à placer un échantillon du matériau entre deux pinces qui le serrent. Les dimensions de l'échantillon, telles que la longueur et la section transversale, sont connues. Ensuite, un poids est appliqué sur l'échantillon, saisi à une extrémité, tandis que l'autre extrémité est fixée. La charge (ou force) est progressivement augmentée, tout en mesurant simultanément le changement de longueur de l'échantillon.



Figure III. 17. Machine de traction « Zwick/Roell Z050 » et logiciel « TestXpert »

III.b.4 Analyse statistique

On a trois facteurs de contrôle ; (i) le nombre de couches, (ii) le diamètre des couches et (iii) temps d'immersion dans l'eau de mer ont été étiquetés avec A, B et C, respectivement, ou deux niveaux de contrôle pour le facteur A et quatre niveaux pour les facteurs B et C ont été considérés comme montrés dans le tableau III.15. Les données expérimentales ont été analysées à l'aide d'un logiciel statistique Minitab 17 pour l'analyse de régression pour ajuster une équation polynomiale du second degré est aussi pour l'évaluation de la signification.R

Tableau III.15. Facteurs de contrôle et leurs niveaux.

Facteurs		Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
A	Nombre de couches	1	3	-	-
B	Diamètre des couches	300	450	500	600
C	temps d'immersion dans l'eau	0	3	21	30

Des analyses de variance du module d'Young (E), de la résistance maximale (R_m) et de l'allongement total (At) sur les propriétés des matériaux composites avec une fibre de polyester insaturé renforcée de fibres de verre At (CMPG) ont été réalisées selon le plan de Taguchi (le tableau orthogonal mixte L32).

Chapitre III.B : Analyse

Les réponses des variables de sortie et pour diverses combinaisons de variables d'entrée ont été explorées et affichées dans le tableau III .16. L'objectif principal de cette analyse est d'étudier les effets du nombre, et diamètre de couches et du temps d'immersion en eau de mer.

Tableau **III.16.** Réseau orthogonal L32 de Taguchi.

<u>les données d'entrées</u>				<u>Les données de sorties</u>			<u>Les données d'entrées</u>				<u>Les données de sorties</u>		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>Rm</i>	<i>At</i>		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	<i>Rm</i>	<i>At</i>
1	1	300	0	6.012 27	51.489	1.23074	17	3	300	0	6.491 40	65.339	1.72331
2	1	450	0	6.409 18	66.608	1.24850	18	3	450	0	7.109 35	82.071	1.72943
3	1	500	0	8.059 55	150.898	1.25635	19	3	500	0	9.939 06	158.296	1.74995
4	1	600	0	8.039 06	150.296	1.25015	20	3	600	0	8.993 58	157.568	1.73890
5	1	300	3	5.179 61	45.826	1.23565	21	3	300	3	6.001 23	62.337	1.72364
6	1	450	3	5.457 37	62.834	1.24908	22	3	450	3	6.989 30	80.295	1.72998
7	1	500	3	7.967 96	149.964	1.26865	23	3	500	3	9.922 25	158.010	1.75000
8	1	600	3	7.522 34	148.867	1.26696	24	3	600	3	8.810 04	156.058	1.73903
9	1	300	21	4.001 56	31.021	1.26237	25	3	300	21	5.198 93	55.266	1.72704
10	1	450	21	4.957 26	40.826	1.48468	26	3	450	21	6.297 04	68.295	1.73110
11	1	500	21	6.438 57	110.898	1.60564	27	3	500	21	9.018 25	140.130	1.79896
12	1	600	21	6.052 67	65.992	1.52458	28	3	600	21	7.947 94	111.310	1.76987
13	1	300	30	4.000 00	30.895	1.26846	29	3	300	30	5.154 58	55.264	1.72750
14	1	450	30	4.955 00	40.175	1.48904	30	3	450	30	6.296 24	68.295	1.73320
15	1	500	30	6.435 20	110.887	1.60965	31	3	500	30	9.000 79	140.119	1.79931
16	1	600	30	6.000 19	65.002	1.52796	32	3	600	30	7.923 36	111.283	1.77000

L'analyse de la variance (ANOVA) a été effectuée au niveau significatif $\alpha = 0,05$ correspondant à un niveau de confiance de 95 %. Dans l'ANOVA, la variabilité totale des facteurs source (principal et interaction) est mesurée par la somme des écarts au carré par rapport à la moyenne totale.

La somme totale des écarts au carré peut être calculée par la formule suivante :

$$SS_T = SS_{d-Source\ factors} - SS_{d-error} \quad (III. 1)$$

Les carrés moyens (MS) peuvent être calculés par la formule suivante :

$$MS = SS_d / DF \quad (III. 2)$$

De plus, le rapport signal sur bruit (SNR) peut être calculé comme une transformation logarithmique de la fonction de perte comme indiqué ci-dessous :

$$Nominal\ the\ best - SNR_i = 10 \log \left(\frac{y^2}{s_i^2} \right) \quad (III. 3)$$

$$Nominal\ the\ better - SNR_i = -10 \log \left(\sum_{j=1}^n \frac{\bar{y}^2}{n} \right) \quad (III. 4)$$

$$larger\ the\ better - SNR_i = -10 \log \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{y_j} \right) \quad (III. 5)$$

Où la moyenne de la réponse et la variance sont données par :

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (III. 6)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{i,j} - \bar{y}_i)^2 \quad (III. 7)$$

III.b.5 Résultat et discussion

III.b.5.1 Équation de régression

L'équation de régression polynomiale a été développée à l'aide d'une analyse de la variance (ANOVA) afin d'analyser la corrélation entre les variables de préparation avant que les coefficients de régression ne soient estimés pour les termes linéaires et d'interaction. Les équations d'ajustement du modèle, obtenues à l'aide du coefficient de convergence, se sont avérées différentes pour les trois réponses Suivant le R^2 .

La méthode de Taguchi s'exprime par :

$$\begin{aligned}
 E = & 161.2 - 1.734 A - 1.1128 B - 0.336 C + 0.002534 B * B \\
 & + 0.00762 C * C + 0.00957 A * B + 0.0232 A * C \\
 & + 0.000561 B * C - 0.000002 B * B * B - 0.000059 C \\
 & * C * C - 0.000009 A * B * B + 0.000019 A * B * C \\
 & - 0.000717 A * C * C - 0.000001 B * B * C \\
 & - 0.000002 B * C * C
 \end{aligned} \tag{III. 8}$$

De plus, les modèles mathématiques développés pour E et Rm sont exprimés par :

$$\begin{aligned}
 Rm = & 5183 + 25.3 A - 37.06 B - 1.38 C + 0.08497 B * B \\
 & - 0.1902 C * C - 0.0791 A * B - 0.057 A * C \\
 & + 0.01605 B * C - 0.000062 B * B * B + 0.00347 C \\
 & * C * C + 0.000071 A * B * B + 0.001846 A * B * C \\
 & - 0.01390 A * C * C - 0.000036 B * B * C \\
 & + 0.000198 B * C * C
 \end{aligned} \tag{III. 9}$$

$$\begin{aligned}
 At = & 4.08 + 0.5063 A - 0.02341 B - 0.0375 C + 0.000056 B * B \\
 & + 0.000690 C * C - 0.001209 A * B - 0.00091 A * C \\
 & + 0.000167 B * C - 0.000000 B * B * B - 0.000016 C \\
 & * C * C + 0.000001 A * B * B - 0.000015 A * B * C \\
 & + 0.000135 A * C * C - 0.000000 B * B * C \\
 & - 0.000001 B * C * C
 \end{aligned} \tag{III. 10}$$

Notez que A , B et C représentent respectivement le nombre de couches de fibres, le diamètre des couches de fibres et le temps d'immersion dans l'eau de mer. À partir des modèles mathématiques dans les équations. (V.8) et (V.10), on peut observer qu'avec l'augmentation des valeurs de A , B , C , AB , AC , BC , B^2 , C^2 , B^3 , C^3 , AB^2 , AC^2 , CB^2 , BC^2 et ABC , Les réponses des variables de sortie ont été augmentées.

III.b.5.2 Analyse de variance (ANOVA)

D'après les données du tableau III.17, l'analyse ANOVA de la propriété mécanique révèle un ajustement satisfaisant du modèle, avec une moyenne ajustée de l'erreur très faible, soit 0,0886. Ceci indique une variance réduite au sein du groupe. La valeur F dans l'ANOVA représente le rapport de variation entre la moyenne des échantillons et la variation.

Si $p < 0,05$, le paramètre est considéré comme significatif.

L'analyse a également signalé que deux variables individuelles, B et C, ont un impact significatif sur la propriété mécanique E, avec une valeur inférieure à 0,05.

Le seul effet d'interaction significatif sur le rendement de p_{ABC} était entre les facteurs A et B dans le modèle. Les résultats pour AB, AC, BC, B^2 , C^2 , B^3 , C^3 , AB^2 , AC^2 , CB^2 , BC^2 , et ABC indiquent que seuls B^2 et B^3 ont des effets significatifs sur les propriétés mécaniques.

On constate que la prédiction de 0,9455 concorde raisonnablement avec le R^2 ajusté de 0,9663, présentant une différence de 0,0208. Par conséquent, ce modèle peut être utilisé pour explorer le R^2 dans l'espace de conception.

D'un autre côté, l'analyse ANOVA dans le tableau III.18 et le tableau III.19 pour $[R_m, A_t]$ montre que les modèles quadratiques sont bien ajustés, avec des valeurs F de 238,23 et 113,20 respectivement, suggérant que ces modèles sont significatifs, avec B ayant un effet significatif sur R_m , tandis que A, B, et C ont tous des effets significatifs

Chapitre III.B : Analyse

Tableau III.17. ANOVA pour la variance du module de Young (E)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	15	80.1342	5.3423	60.27	0.000
A	1	0.2751	0.2751	3.10	0.097
B	1	14.4460	14.4460	162.97	0.000
C	1	0.4992	0.4992	5.63	0.031
B*B	1	14.7158	14.7158	166.01	0.000
C*C	1	0.1503	0.1503	1.70	0.211
A*B	1	0.4053	0.4053	4.57	0.048
A*C	1	0.0644	0.0644	0.73	0.407
B*C	1	0.1666	0.1666	1.88	0.189
B*B*B	1	14.6810	14.6810	165.62	0.000
C*C*C	1	0.0324	0.0324	0.37	0.554
A*B*B	1	0.3243	0.3243	3.66	0.074
A*B*C	1	0.0205	0.0205	0.23	0.637
A*C*C	1	0.0968	0.0968	1.09	0.312
B*B*C	1	0.2020	0.2020	2.28	0.151
B*C*C	1	0.0112	0.0112	0.13	0.727
Error	16	1.4183	0.0886		
Total	31	81.5525			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	96.63%	94.55%
0.297731	98.26%				

Tableau III.18. ANOVA pour la résistance maximale (R_m)

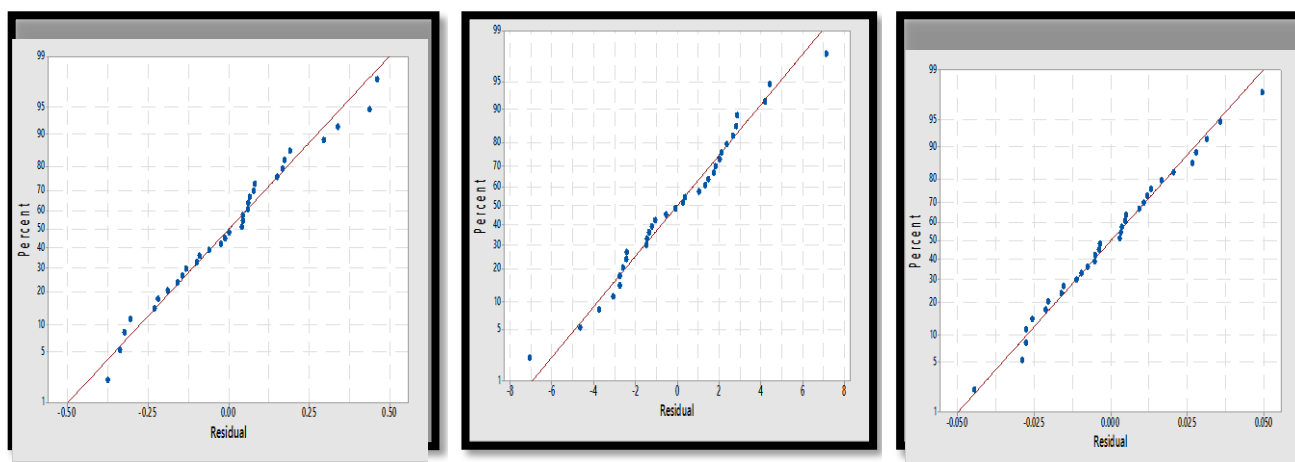
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression A	15	61438.1	4095.9	238.23	0.000
B C	1	58.7	58.7	3.42	0.083
B*B C*C A*B A*C	1	16018.8	16018.8	931.70	0.000
B*C B*B*B C*C*C	1	8.4	8.4	0.49	0.495
A*B*B A*B*C A*C*C	1	16551.0	16551.0	962.66	0.000
B*B*C B*C*C	1	93.7	93.7	5.45	0.033
Error	1	27.7	27.7	1.61	0.222
	1	0.4	0.4	0.02	0.882
Total	1	136.5	136.5	7.94	0.012
	1	16593.5	16593.5	965.13	0.000
	1	112.3	112.3	6.53	0.021
	1	18.2	18.2	1.06	0.318
	1	198.3	198.3	11.53	0.004
	1	36.4	36.4	2.12	0.165
	1	712.5	712.5	41.44	0.000
	1	86.9	86.9	5.06	0.039
	16	275.1	17.2		
	31	61713.2			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
4.14644	99.55%	99.14%	97.76%

Tableau III.19 ANOVA pour l'allongement total (*At*)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression A	15	0.50698	0.100465	113.20	0.000
B C	1	0.02345	0.023448	26.42	0.000
B*B C*C A*B A*C	1	0.00639	0.006393	7.20	0.016
B*C B*B*B C*C*C	1	0.00621	0.006214	7.00	0.018
A*B*B A*B*C A*C*C	1	0.00725	0.007249	8.17	0.011
B*B*C B*C*C	1	0.00123	0.001233	1.39	0.256
Error Total	1	0.00647	0.006469	7.29	0.016
	1	0.00010	0.000098	0.11	0.743
	1	0.01480	0.014797	16.67	0.001
	1	0.00806	0.008061	9.08	0.008
	1	0.00231	0.002313	2.61	0.126
	1	0.00658	0.006578	7.41	0.015
	1	0.01293	0.012927	14.56	0.002
	1	0.00343	0.003431	3.87	0.067
	1	0.00655	0.006553	7.38	0.015
	1	0.00121	0.001208	1.36	0.260
	16	0.01420	0.000888		
	31	1.52118			

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	0.0297913	99.07%
	98.19%	95.36%			



a.)

b.)

c.)

Figure III.18. Diagrammes de probabilité normale des résidus pour R% de (a) , (b) et (c) .

Les figures III.18 (a)-(c) montrent les valeurs prédites par rapport aux valeurs expérimentales de *E*, *Rm* et *At* respectivement. On constate que les modèles développés réussissent à capter la corrélation entre les variables de préparation (*A* nombre de couches, *B* diamètre des couches et *C* temps d'immersion dans l'eau de mer) aux réponses lorsque les valeurs prédites obtenues sont assez proches des valeurs expérimentales.

Les points sont alignés de manière cohérente, ce qui indique que les distributions normales sont préservées.

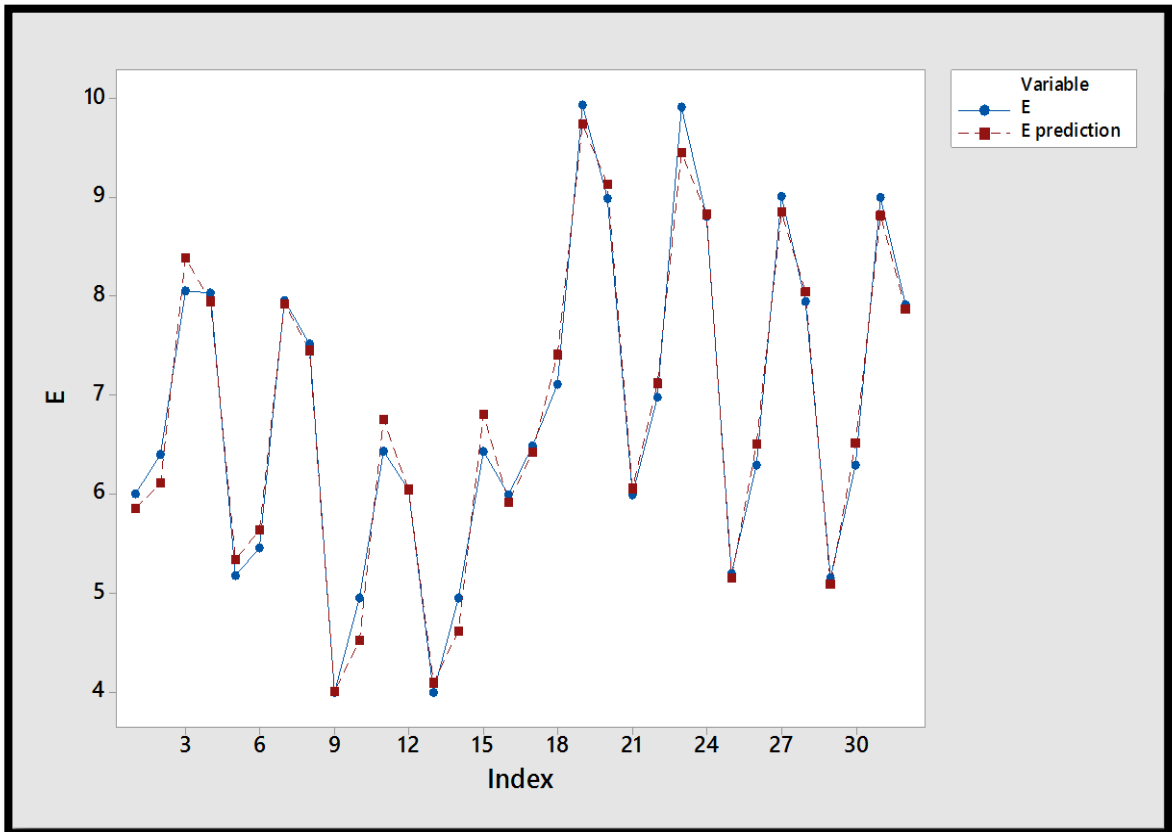
III.b .5.3 Analyse d'optimisation et validation du modèle

La figure III.18 décrit le modèle de régression qui nous permet d'estimer la corrélation des données expérimentales. Cela consiste à trouver la relation permettant d'expliquer le comportement des réponses des propriétés mécaniques ((a), (b) et (c)) mesurées en fonction des réponses prédites de E , Rm et At . La dispersion de la réponse mesurée est une mesure de la corrélation. Si la dispersion est faible, l'analyse de régression est appropriée pour décrire la variation de cette réponse et si la dispersion est élevée, l'analyse de régression n'est pas appropriée. Les résultats obtenus révèlent que les points qui représentent les réponses mesurées coïncident presque sur la courbe de référence qui représente la réponse prédite, ce qui reflète une grande convergence entre les deux courbes en termes de changement de valeurs. Une comparaison entre la réponse mesurée et la réponse prédite.

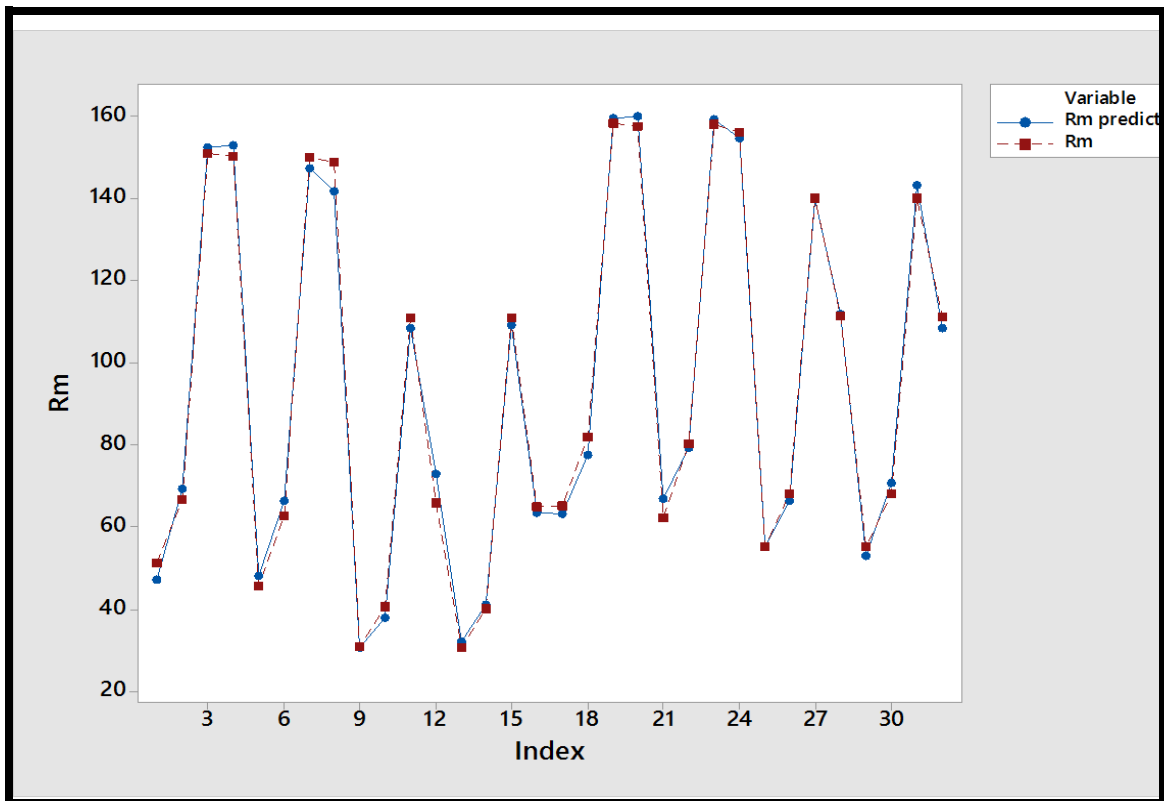
Par conséquent, nous pouvons conclure que ces modèles sont appropriés et cohérents pour prédire les propriétés mécaniques At des composites verre-polyester. La dernière étape de nos recherches a été de trouver des valeurs optimales pour le temps d'immersion dans l'eau de mer ainsi que le nombre et le diamètre des couches de fibres pour obtenir les meilleures propriétés mécaniques. La zone de réponse de pénétration optimisée a été tracée à l'aide du logiciel Minitab et est présentée dans le tableau IV.8. Il faut choisir une fonction de désirabilité pour trouver des valeurs de facteur appropriées. Le tableau montre que l'objectif d'optimisation des propriétés mécaniques est atteint avec 3 couches de diamètre 548,485 $g m$.

La dernière étape de notre enquête consiste à trouver les valeurs optimales du temps d'immersion dans l'eau de mer, ainsi que le nombre et le diamètre des couches de fibres, conduisant aux propriétés mécaniques optimales.

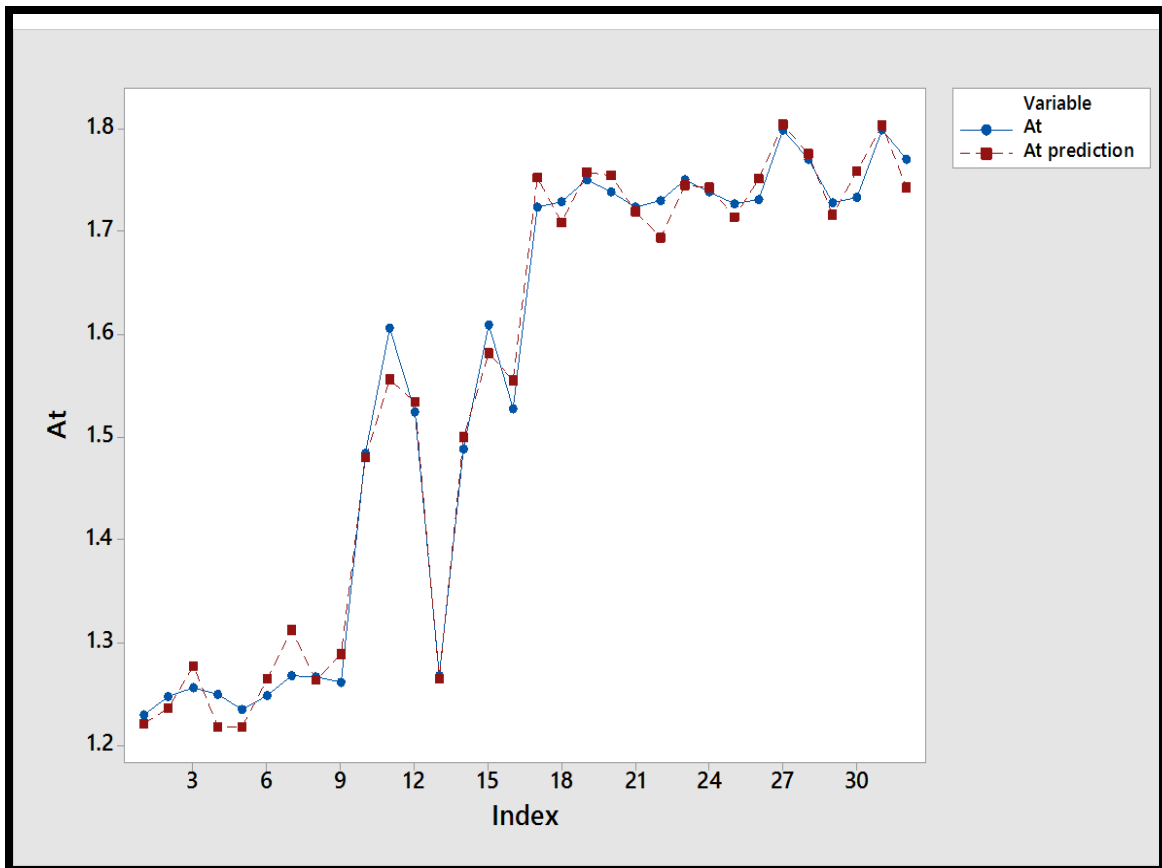
La zone de réponse de pénétration optimisée a été tracée à l'aide du logiciel Minitab, comme indiqué dans le tableau III.19. La fonction de désirabilité a été sélectionnée pour trouver une valeur de facteur appropriée. Ce tableau montre que l'objectif d'optimisation des propriétés mécaniques a été atteint avec 3 couches (548.485 g/m^2), un diamètre de couches de 14.8485 et un temps d'immersion de 2 s dans l'eau de mer. De plus, il est également possible d'estimer le module de Young maximal (E), la résistance maximale (Rm) et l'allongement total (At) pour des conditions optimales, à savoir, 9,9, 179,6 et 1,7998 respectivement.



a-



b.)



c.)

Figure III.19 : Valeurs expérimentales et valeurs prédites pour (a) E, (b) Rm et (c) At.

III.b.6 Conclusion

Ce chapitre présente les effets du temps d'immersion dans l'eau de mer (C), du nombre de couches (A) et du diamètre (B) sur les propriétés mécaniques (variance du module d'Young (E), résistance maximale (Rm) et allongement total (At)).

Des tests statistiques ont été menés sur des composites de fibres de verre renforcés de fibres de polyester insaturées [71-72].



**Conclusion
Générale et
perspectives**

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse représentent une contribution à la recherche des solutions aux problèmes liés aux critères de sélection judicieuse des matériaux composites à matrices thermodurcissable ; et cela par le biais de la détermination des principaux paramètres assurant le compromis meilleures propriétés mécanique-coût réduit.

Etant donné que l'emploi croissant des composites à matrices thermodurcissables dans l'industrie, n'a pas cessé d'augmenter ; nos travaux de recherche se sont focalisé sur une des catégories, dont l'utilisation croit de plus en plus ; qui est le polyester insaturé.

Pour ce faire, nous avons élaboré et caractérisé de deux types de matériaux composites à matrice thermodurcissable et qui ont été caractérisé mécaniquement par essai de traction.

Ainsi, nous avons commencé notre recherche par une étude bibliographique des matériaux composites à matrices thermodurcissables et cela depuis la synthèse jusqu'à la caractérisation mécanique.

Dans ce premier chapitre, nous avons également présenté les différentes techniques utilisées pour l'élaboration industrielle des polymères thermodurcissables et celles employées pour la caractérisation microstructurale, à savoir la diffraction des rayons X ainsi que la microscopie électronique à balayage (MEB).

Les relations microstructures propriétés mécaniques ont été également évoqué dans ce chapitre.

La dernière partie du premier chapitre a été consacré à l'étude du renforcement des polymères avec présentation détaillée des différents matériaux de renforts et à leur tête les fibres de verre.

Cette dernière qui constitue le meilleur choix pour renforcer les polymères a fait l'objet de beaucoup de travaux de recherche. Et étant donné les biens faits de ce type renfort, nous l'avons utilisé dans l'élaboration de nos échantillons.

L'interface représente toujours le point faible des composites, c'est pourquoi nous l'avons pris en considération par l'ajout de la sciure de bois avec des proportions en masse allant de 1 à 10%.

L'élaboration des différentes séries d'éprouvettes réalisées ainsi que les différents résultats de la caractérisation mécanique ont faits l'objet du deuxième chapitre.

Ainsi, nous avons utilisé la traction mécanique comme principale technique de caractérisation afin de déterminer les différentes propriétés mécaniques possibles suite à cet essai. L'évaluation de ces paramètres nous a permis de mettre en évidence l'effet du renfort sur la fragilité des composites élaborés.

C'est un résultat attendu, le gain de certaines propriétés mécaniques vient toujours au détriment d'autres.

Les principaux résultats de ce travail de thèse, fondé essentiellement sur l'élaboration de deux séries de composites à matrices en polyester insaturé et renforcé par les fibres de verre, sont présentés dans le troisième chapitre.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons décrit les recherches appliquées et menées pour étudier les propriétés mécaniques du composite polyester insaturé-fibres de verre, avec différents taux en masse de sciure de bois.

Les essais effectués sur la première série d'éprouvettes ont été réalisés dans les conditions normales de température et de pression.

Les résultats de cette recherche, suite aux tests de traction qui ont été effectués dont le but d'évaluer les différentes propriétés mécaniques relatives à la résistance par extension, nous ont permis d'avoir les données initiales et nécessaires à l'élaboration des matériaux composites à propriétés mécaniques optimales.

A l'issue de cette étude nous sommes arrivés à déterminer les différents taux des éléments additifs à savoir les fibres de verre ainsi que la sciure de bois, donnant naissance aux meilleurs composites à matrice polyester insaturé.

Dans la deuxième partie du troisième chapitre nous avons menés des recherches appliquées sur une deuxième série d'éprouvettes, mais cette fois-ci, après immersion dans l'eau de mer en trois temps (03, 21 et 30 jours) et avec différents diamètres des fibres de verres.

Cette dernière série d'essai nous a permis d'élargir notre base de données expérimentales.

Les principaux résultats trouvés suite à cette caractérisation ont été exploités pour réaliser une étude statistique par analyse de variance (ANOVA) tout en proposant un modèle mettant en évidence l'effet du temps d'immersion dans l'eau de mer, du nombre et du diamètre des couches sur les propriétés mécaniques (module d'élasticité, résistance maximale et allongement total) de matériaux composites à matrice en polyester insaturé renforcés par des fibres de verre.

Afin de simplifier le protocole expérimental et pour mettre en évidence l'effet des facteurs d'expérimentation sur la réponse, nous avons aussi utilisé le modèle statistique réduit de Taguchi.

Ces deux modèles ont été déterminé pour optimiser les critères suscités et de mettre en évidence leur influence sur les propriétés mécaniques.

L'utilisation d'autres techniques de caractérisation à savoir macroscopique et microstructurale va nous permettre certainement de valider les différents modèles statistiques trouvés et élargir le domaine d'application des composites.



Références

Bibliographies

Références

Bibliographies

- [1] Nagavally RR. Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications. *Int J Mech Prod Eng.* 2017;5:82-7.
- [2] Marc Marzano PC. Les matériaux composites. ANFA2014.
- [3] Latifa MBH. Elaboration de matériaux composites biodégradables issus de ressources renouvelables: Université de Mostaganem; 2016.
- [4] Gornet L. Généralités sur les matériaux composites. France2008.
- [5] BOUFAIDA Z. Analyse des propriétés mécaniques de composites taffetas verre/matrice acrylique en relation avec les propriétés d'adhésion des fibres sur la matrice: Université de lorraine; 2015.
- [6] Harris B. *Engineering composite materials.* London: The Institute of Materials; 1999.
- [7] El Hadji Babacar L. Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose: thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble; 2008.
- [8] Sommers A, Wang Q, Han X, T'Joen C, Park Y, Jacobi A. Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems—A review. *Applied Thermal Engineering.* 2010;30:1277-91.
- [9] Dejou J. Les céramiques. Support de cours de la Société Francophone Des Biomatériaux Dentaires. 2009;2010.
- [10] Gao X, Cui W, Yao L, Zhou Y, Wang G. Construction of Knowledge Map of Continuous Fiber Reinforced Ceramic Matrix Composites. *Proceedings of the 2019 8th International Conference on Computing and Pattern Recognition.* Beijing, China: Association for Computing Machinery; 2019. p. 501–6.
- [11] Chawla KK. *Matrix Materials. Composite Materials.* Springer2019.
- [12] Khayal OMES. *MANUFACTURING AND PROCESSING OF COMPOSITE MATERIALS.* ScienceDirect; 2019.

- [13] Asma S. Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (le diss): caractérisation, durabilité et application au cas de la maçonnerie: Université Badji Mokhtar; 2015.
- [14] Feng C, Chu Z. Fiber reinforcement. *Composite Materials Engineering*, Volume 1: Springer; 2018. p. 63-150.
- [15] Bunsell AR. Fibers for composite reinforcements: Properties and microstructures. *Composite Reinforcements for Optimum Performance*: Elsevier; 2021. p. 3-34.
- [16] Hassanpour M, Shafigh P, Mahmud HB. Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement – A review. *Construction and Building Materials*. 2012;37:452-61.
- [17] Arisoy B, Wu H-C. Material characteristics of high performance lightweight concrete reinforced with PVA. *Construction and Building Materials*. 2008;22:635-45.
- [18] Hami B. Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'une structure sandwich multicouches: Université M'hamed Bougara de Boumerdès, Département Génie; 2018.
- [19] Mohanty AK, Misra M, Drzal LT. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites: CRCpress; 2005.
- [20] Shamshina JL, Berton P, Rogers RD. Advances in Functional Chitin Materials: A Review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2019;7:6444-57.
- [21] Kim, H., Lee, J., & Kim, N. (2015). Microstructure and tensile behavior of carbon fiber reinforced polymer composite with hierarchical porosity. *Composite Structures*, 130, 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.019>
- [22] Hou, M., Chen, X., & Fang, D. (2019). Interfacial structure and properties of carbon fiber reinforced thermoplastic composites after thermal cycling. *Composites Part B: Engineering*, 157, 176-183. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.082>
- [23] P. Vannucci, "Matériaux composites structuraux méthodes d'analyse et de conception", Master DSME, Université de Versailles et Saint-Quentin-en-Yvelines. Ed. EDP, Science, France, 2007.
- [24] J. Molimard., "Mécanique des Matériaux composites", EMSE, Version 2, 2004.
- [25] C. Berdin., "Elasticité linéaire anisotrope matériaux composites", Ed. EDP, Science, 2004-2005.
- [26] KOLLAR, L. P., SPRINGER, G. "Mechanics of Composite Structures",

Cambridge University Press. 2003.

- [27] Samuel Forest., Michel Amestoy et al, “Mécanique des milieux continus”, Ecole des mines, Paris, 2009-2010.
- [28] Laurent BAILLET “Concentration de contraintes autour d’un trou circulaire Fonction d’Airy” Elasticité /UFR Mécanique / UJF Grenoble.
- [29] Walter D. Pilkey., Deborah F. Pilkey “Stress Concentration factors”, 3eme édition TA417.6.P43, 2007.
- [30] Chevalier L., Eddhahak A., Maalej Y., “Concentration de contraintes : différentes Techniques de mesures”. (Première partie), Revue Technologie, n°133, 2004.
- [31] Laroze S., Barran J.J. (1983), Mécanique des structures. Tome 4 : “Calcul des structures en matériaux composites”. Eyroues, Masson.
- [32] Tan S.C., “Finite-width correction factors for anisotropic plate containing a central opening”. Journal of Composite Materials, vol. 22, p. 1080-1097, 1988.
- [33] Lekhnitskii, S. G., “Anisotropic Plates”, Translated from the 2nd Russian edition by .S.W. Tsai and T. Cheron, Gordon, Breach Science Publishers Inc .N4, 1968.
- [34] A. E. Green and W. Zerna, “Theoretical Elasticity”, London, U. K: Clarendon Press, 1954.
- [35] H. Murat Arslan, “Effect of anisotropy on laminated composite plates containing circular holes”, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 12, pp. 207- 213, June 2005.
- [36] H. Murat Arslan, “Stress concentration in fibre reinforced composite plates containing circular holes subjected to shear stress”, Kuwait j.Sci.Eng.34 (1B) pp.1- 18, 2007.
- [37] Savin, G.N, “Stress distribution around Holes”, NASA Technical translation, NASA TT F-607, 1961.
- [38] Whitney, J.M. and Nuismer, R.J., “Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations”, Journal of Composite Materials, pp 253-265, 1974.
- [39] William L. Ko, “Stress concentration around a small circular hole in the HIMAT Composites plate”, NASA Technical Memorandum 86038, 1985.
- [40] W. J. Hwang, Y. T. Park, W. Hwang “Strength of fibre reinforced meal laminates with a circular Hole”, Metals and Materials International, Vol. 11, No. 3 , pp. 197-204, 2005.

- [41] Soutis C., Filiou., “Stress distributions around holes in composite laminates subjected to biaxial loading”, *Applied composites Materials*, 5:365–378, 1998.
- [42] Nuismer, R.J., and Whitney, J.M. “Uniaxial failure of composite laminates containing stress concentrations”. *Fracture Mechanics of composites*, ASTM ATP 593, pp 117- 142, 1975.
- [43] Sharma, D.S, “Stress Concentration around circular/elliptical/triangular cutouts in infinite composite plate”, In: *Proceedings of the world Congress on Engineering*. London, 2011.
- [44] Kaltakci, M.Y, “Stress concentrations and failure criteria in anisotropic plates with circular holes subjected to tension or compression”. *Computers & structures*, 61 (1): p. 67-78, 1996.
- [45] ANSYS Help System. “Analysis guide and theory”, Reference, version 12.1. 2014.
- [46] Yao Weixing., Yu Xinlu, “Stress concentration factor for an orthotropic finite-width plate containing elliptical edge notches”, *Composites Science and Technology*, 41 (1991) 47-53.
- [47] V.G. Ukadgaonker, D.K.N. Rao, “A general solution for stresses around holes in symmetric laminates under inplane loading”, *Composite Structures* 49, 339-354, 2000.
- [48] N. Belloul., “Procédé de fabrication de structure en composites en composites verre/polyester”, *Thèse de magister en polymères et composites de l’université de Boumerdes*, 2007.
- [49] ASTM. D3039-00, “Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials”, 15-3, 2000.
- [50] Lévesque Martin, “L’essai de traction des matériaux composites unidirectionnels à fibres continues”, *Thèse de doctorat, Université de Montréal*, 2000.
- [51] Doucement technique de instron, www.INSTRON 5969.com.
- [52] Walid Tria, Bachir cheboubi, “ Etude de l’influence d’un trou dans les plaques en matériaux composites ”, *Mémoire de fin d’étude, université de Mohamed khider de Biskra*, 72 p. 2011.
- [53] E. M. C. Jones, “Documentation for Matlab-based DIC code”, *Université of Illinois, USA*, version 1 - 130814 EJ, 2013.
- [54] Lotfi Toubal, Moussa Karama, Bernard Lorrain “Identification des Critères de rupture d’un composite carbone-époxy en présence d’une singularité”, *Ecole Nationale d’Ingénieurs de Tarbes. France*, 2004.

- [55] Lotfi Toubal, Moussa Karama, Bernard Lorrain “Stress concentration in a circular hole in composite plate”, *Composite Structures*, 68, 31–36.2005.
- [56] B. Vieille . Aucher, L. Taleb, “over stress accommodation in notched woven- ply thermoplastic laminates at high-temperature: Numerical modeling and validation by Digital Image Correlation”, *Composites: Part B* 45 p290–302. 2013.
- [57] Rommel Cintrón. Victor Saouma, “Strain Measurements with the Digital Image Correlation System Vic-2D”, Department of Civil Environmental and Architectural Engineering University of Colorado UCB 428, 2008.
- [58] Stephen Hall “Full-field displacement/strain measurements and Digital Image Correlation – principles and methods”, Division of Solid Mechanics, Lund University, Sweden & European Spallation Source, Lund, Sweden. 2007.
- [59] Catherine Bewerse, Keith R. Gall, Gavin J. McFarland, Pingping Zhu , L. Catherine digital Brinson “Local and global strains and strain ratios in shape memory alloys using image correlation”, *Materials Science & Engineering A* 568 p134–142, 2013.
- [60] Storū Yoneyama, Go Murasawa, “Digital Image Correlation”, *Experimental mechanics*, Depatement of mechanical engineering, Aoyama Gakuim and Yamagata University, Japan,
- [61] Sourya D. Pandita, Kazuaki Nishiyabu, Ignaas Verpoest, “Strain concentrations in woven fabric composites with holes”, *Composite Structures*, 59361–368, 2003.
- [62] Arifuzzaman, M., & Mouritz, A. P. (2012). A review of fatigue behaviour of polymer matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(9), 1762-1784.
- [63] Song, G., & Ye, L. (2007). Fatigue behavior of fiber reinforced thermoplastic and thermosetting polymer matrix composites: A review. *Polymer Testing*, 26(4), 479-491.
- [64] Kim, J. K., & Lee, S. H. (2004). Fatigue crack growth in carbon/epoxy composites with different lay-ups. *Composite Structures*, 64(1), 61-68.
- [65] Vlot, A., & Warnet, L. (2016). Effect of fatigue on the mechanical behaviour of thermoplastic and thermosetting composite materials. *Procedia Engineering*, 151, 198-203.

- [66] Jasgurpreet Singh Chohan , Kamaljit Singh Boparai , Rupinder Singh, M.S.J Hashmi .(2020) . Manufacturing techniques and applications of polymer matrix composites: a brief review. *Advances in Materials and Processing Technologies*. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1835012>.
- [67] Daniel Gay, Suong V Hoa , Stephen W Tsai .(2003). *Composite Materials Design and Applications* , CRC Press LLC. <https://doi.org/10.1201/9781420031683> .
- [68] Autar K, Kaw .(2005). *Mechanics of Composite Materials* , 2nd Edition , Taylor & Francis Group, LLC.
- <https://doi.org/10.1201/9781420058291>
- [69] D. Dobрева , S. Nenkova , and .al .(2006). Morphology and Mechanical Properties of Polypropylene – Wood Flour Composites ” , Department of Polymer Engineering , Bulgaria , 209–219. <https://doi.org/10.15376/biores.1.2.209-219>.
- [70] G. Huang & S. Hong xia, Effect of water absorption on the mechanical properties of glass polyester composites, *Materials and Design* 28 (2007), 1647–1650
- [71] S. Pavlidou, C.D. Papaspyrides, The effect of hygrothermal history on water absorption and interlaminar shear strength of glass-polyester composites with different interfacial strength *Composites: Part A* 34 (2003) 1117–1124.
- [72] S. Marais, M. Metayer M, T.Q. Nguyen, M. Labbe, J.M. Saiter, Diffusion and permeation of water through unsaturated polyester resins- influence of resin curing *European Polymer Journal* 36 (2000) 453–62